

DOI: 10.24850/j-tyca-2024-05-08

Notas

Ley evolutiva de la relación entre el lago Dongting y las tres desembocaduras del río Jingjiang en los últimos 60 años

Evolutionary law of the relationship between Dongting Lake and three outlets of Jingjiang River in recent 60 years

GuangWei Hu¹

YeWei Liang²

YiLan Ma³

HaiLi Feng⁴

¹Escuela de Economía y Gestión, Universidad de Dali, Dali, provincia de Yunnan, 671003, China / Escuela de Ciencias Urbanas y Medioambientales, Universidad Tecnológica de Hunan, Zhuzhou, provincia de Hunan, 412007, China, 280452570@qq.com

²Facultad de Ciencias Urbanas y Medioambientales, Hunan University of Technology, Zhuzhou, provincia de Hunan, China, 1134564131@qq.com



³Facultad de Ciencias Urbanas y Medioambientales, Hunan University of Technology, Zhuzhou, provincia de Hunan, China, 965478796@qq.com

⁴Facultad de Ciencias Urbanas y Medioambientales, Hunan University of Technology, Zhuzhou, provincia de Hunan, China, 410000591@qq.com

Autor para correspondencia: GuangWei Hu, 280452570@qq.com

Resumen

El embalse de las Tres Gargantas ha comenzado a desempeñar un papel integral en la generación de energía, el control de inundaciones, el transporte marítimo y otros aspectos desde el 1° de junio de 2003. Utilizando datos de escorrentía y transporte de sedimentos de series temporales largas, la evolución de la relación del lago Dongting y las tres desembocaduras del río Jingjiang después de la operación de las Tres Gargantas, el proyecto se analizó utilizando redes neuronales de propagación posterior, prueba de tendencia de Mann-Kendall y curvas acumulativas dobles. Los resultados muestran lo siguiente: 1) a escala interanual e interdecadal, la disminución de la escorrentía del lago Dongting se debe principalmente a la fuerte disminución de la escorrentía de las tres desembocaduras; hasta cierto punto, la sedimentación del lago Dongting se alivió debido a la reducción del transporte de sedimentos procedentes de las tres desembocaduras; 2) al analizar la consistencia de la escorrentía y el transporte de sedimentos dentro y fuera del lago Dongting, se encontró que la influencia de la ingeniería hidráulica en el



río Yangtze en la escorrentía, y el sedimento que entra y sale del lago Dongting es asincrónico; la tasa de descomposición del sedimento en el lago es mucho mayor que la tasa de descomposición del sedimento fuera del lago; 3) a partir del cambio de tendencia de los días secos de las tres desembocaduras, éstas tienden a estar sedimentadas, y los ríos Ouchi y Hudu disminuyen gradualmente; 4) desde la línea de proceso de sedimentación del lago Dongting, la sedimentación acumulada del lago Dongting desde 2003 hasta 2018 fue de $-2\ 829 \times 10^4$ t, y el lago Dongting cambió de estado de sedimentación a estado de erosión; 5) se utilizó un modelo de red neuronal de propagación trasera para simular la escorrentía y el transporte de sedimentos del lago Dongting, y los resultados muestran que la precisión de la simulación satisfizo las necesidades de predicción de la escorrentía y el transporte de sedimentos del lago Dongting.

Palabras clave: red neuronal de propagación trasera, escorrentía y variación de sedimentos, tres desembocaduras de Jingjiang, lago Dongting, embalse de las Tres Gargantas.

Abstract

The Three Gorges Reservoir has begun to play a comprehensive role in power generation, flood control, shipping and other aspects, since June 1, 2003. Using long time series runoff and sediment transport data, the evolution of the relationship of the Dongting Lake and the three outlets of the Jingjiang River after operation of the Three Gorges Project was



analyzed using Back Propagation neural networks, Mann-Kendall trend test, and double cumulative curves. The results show that: 1) On interannual and interdecadal scales, the decrease in runoff from Dongting Lake is mainly caused by the sharp decrease in runoff from the three outlets. To some extent, the siltation of the Dongting Lake was alleviated because of the reduction of sediment transport coming from the three outlets; 2) by analyzing the consistency of runoff and sediment transport in and out of Dongting Lake, it was found that the influence of the hydraulic engineering in the Yangtze River on runoff and sediment entering and leaving Dongting Lake is asynchronous. The rate of decay of sediment into the Lake is much greater than the decay rate of sediment out of the Lake; 3) from the trend change of the dried-up days of the three outlets, the three outlets tend to be silted, and the Ouchi River and the Hudu River gradually decline; 4) From the sedimentation process line of Dongting Lake, cumulative sedimentation of Dongting Lake from 2003 to 2018 was -2.829×10^4 t, and the Dongting Lake changed from siltation state to erosion state; 5) a back propagation neural network model was used to simulate the runoff and sediment transport of Dongting Lake, and the results show that the simulation accuracy met the needs of Dongting Lake runoff and sediment transport prediction.

Keywords: Back propagation neural network, runoff and sediment variation, Jingjiang three outlets, Dongting Lake, the Three Gorges Reservoir.



Recibido: 22/12/2022

Aceptado: 25/03/2023

Publicado Online: 10/04/2023

Introducción

Durante casi cien años, el lago Dongting se ha reducido bajo la doble influencia de las actividades humanas y la naturaleza, y la situación del control de inundaciones es sombría. Especialmente después de que el proyecto de las Tres Gargantas estuviera en funcionamiento, la descarga y el transporte de sedimentos desde los tres estuarios al lago Dongting han cambiado de forma dramática, y la relación entre el río y el lago se ha vuelto más complicada. Muchos estudiosos han presentado numerosos resultados de investigación sobre el río Yangtze y el lago Dongting (Chen, 2016; Han, 2014; Hu & Wang, 2014; Hu, Mao, Li, Tan, & Feng, 2013; Li & Wang, 1997; Lu, 2005; Lu & Luo, 1999; Lu & Yao, 2018; Wan, Yang, Wang, Qin, & Dai, 2014). Sobre todo en los últimos 10 años, diversos investigadores han estudiado el impacto de las actividades humanas en el lago Dongting, como la recuperación de tierras del lago, la construcción del Proyecto de las Tres Gargantas, etcétera (Ban *et al.*, 2014; Chen, 2016; Dai, Lu, Li, & Wang, 2017; Hu *et al.*, 2013; Hu, Mao, Li, Tian, & Feng, 2014a; Hu, Mao, Li, Zeng, & Feng, 2014c; Hu & Zhang, 2018; Shuai, Li, Li, & Li, 2018; Xi *et al.*, 2014; Zhang, Wang, & Tian, 2016). La mayoría de los estudios se centran en cálculos de sedimentación (Guo, Yao, & Yan,



2011; Hong, Dong, & Li, 2007; Hu & Wang, 2014; Jiang, Huang, & Sun, 2009; Lu & Yao, 2018; Shi, Xia, & Yang, 1999); inundaciones y protección contra inundaciones (Hu & Mao, 2017; Lu, 2009; Mao & Xia, 2005); situación del agua del lago (Hu & Mao, 2017; Huang, Sun, & Jiang, 2011; Sun *et al.*, 2018a); entorno acuático (Hu, 2014; Hu & Zhang, 2018; Shuai *et al.*, 2018; Wang, Ou, Zhang, & Lu, 2015); nivel del agua (Hong *et al.*, 2007; Jiang & Huang, 1996; Sun *et al.*, 2018b); función de servicio ecosistémico ((Deng, Zhong, Xie, Wan, & Song, 2019); humedales (Wu, 2016); organismos acuáticos (Wang *et al.*, 2018), etcétera. Las literaturas existentes han analizado las características dinámicas temporales del transporte anual de sedimentos en las tres desembocaduras y del transporte de sedimentos fuera del lago Dongting en las últimas décadas. Los resultados muestran que el proyecto Jingjiang Bend y el proyecto de Tres Gargantas son las principales causas de la disminución significativa en el transporte de sedimentos desde el lago Dongting. Sin embargo, hay pocos artículos relevantes que analicen y estudien de modo simultáneo las cargas de sedimentos de las tres desembocaduras y los cuatro ríos de Jingjiang que ingresan al lago, la salida del lago Dongting y la sedimentación del lago Dongting. Por lo tanto, el estudio sistemático de la respuesta de los sistemas lacustres a la esorrentía y la variación de sedimentos bajo los efectos combinados de las actividades naturales y humanas sigue siendo un campo fronterizo de la investigación del lago Dongting. Las redes neuronales de BP, la prueba M-K, la doble curva acumulativa y otros métodos se utilizan para analizar la ley de evolución de la relación entre las tres bocas del lago Dongting y Jingjiang en los

últimos 60 años después de la operación del Proyecto de Tres Gargantas, con el fin de proporcionar una referencia para el estudio del agua y los sedimentos del lago Dongting.

Materiales y métodos

Área de estudio

El lago Dongting se encuentra en el noreste de la provincia de Hunan, en la orilla sur del río Jingjiang, que conecta las provincias de Hunan y Hubei, China. El lago Dongting se encuentra cerca del curso medio del río Yangtze. Los cambios en la escorrentía y sedimentación del lago causados por la interacción río-lago han sido el foco de atención de hidrólogos y geógrafos. El lago Dongting es de suma importancia, conectado por el río en el medio del río Yangtze, que distribuye la escorrentía y los sedimentos de las tres desembocaduras de Songzi, Taiping y Ouchi, y reúne los ríos Sishui de Xiang, Zi, Yuan y Li, así como los alrededores del río Miluo y el río Xinqiang, y otros ríos pequeños, que forman un complicado río-lago (Figura 1). El lago Dongting es un área que juega un papel importante en la regulación de las inundaciones y la protección de los ecosistemas de humedales. La zona de captación total del lago Dongting es de 259 430 km², de los cuales, la superficie acuática del lago es de 2 625 km².

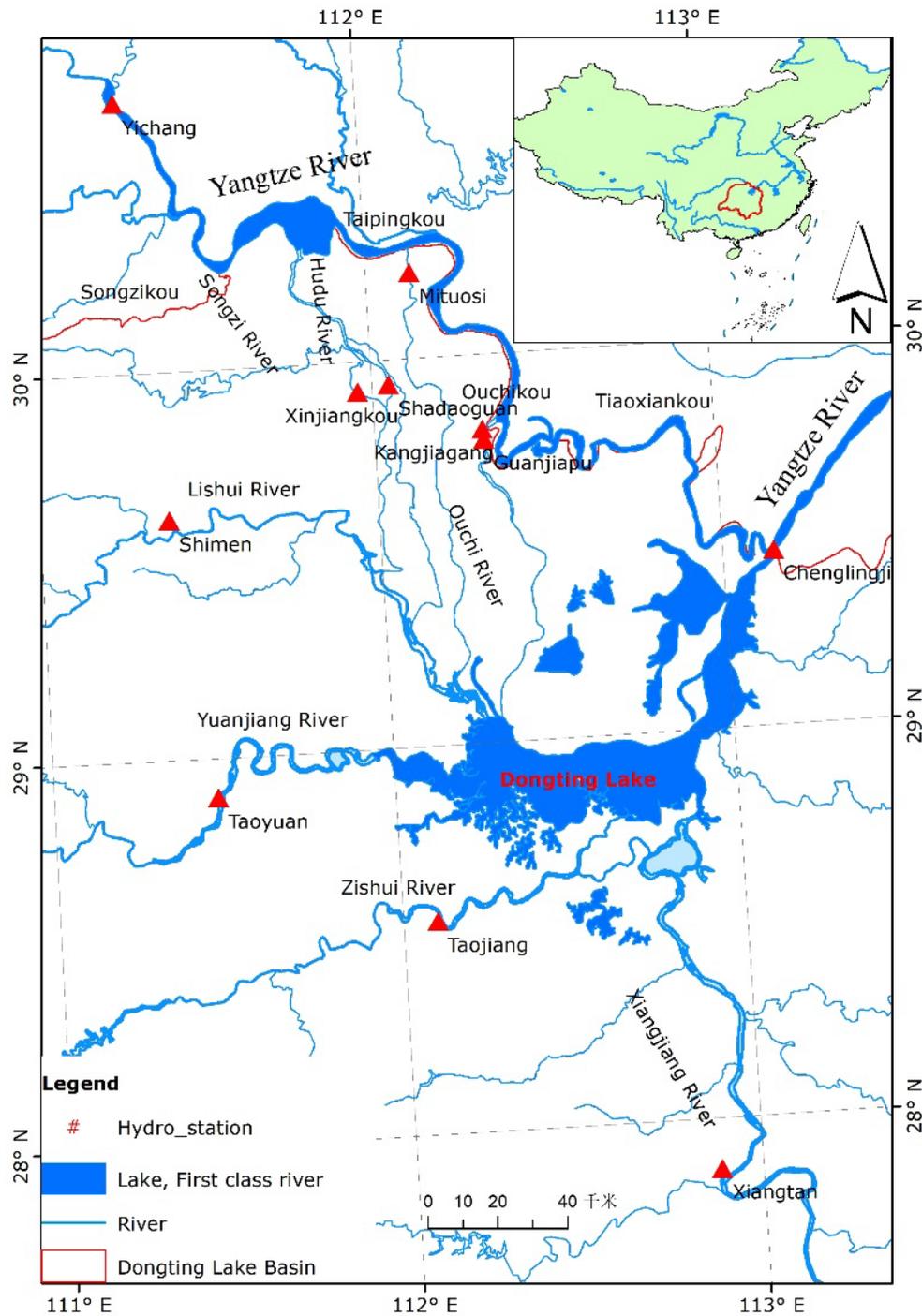


Figura 1. Estructura del sistema de agua de la cuenca del lago Dongting.

Datos

Los datos medidos de escorrentía y sedimentos de las principales estaciones de control se seleccionaron como datos básicos para el análisis de variación de escorrentía y proceso de sedimentos en el lago Dongting durante 1956-2018 (<http://yzt.hnswkcj.com:9090/#/>). Las estaciones de control dentro y fuera del lago Dongting incluyen Xiangtan, Taojiang, Taoyuan, Shimen, Xinjiangkou, Shadaoguan, Mituosi, Kangjiagang, Guanjiapu, Chenglingji. Los datos de agua y sedimentos medidos a lo largo de los años provienen de la Oficina Provincial de Investigación de Hidrología y Recursos Hídricos de Hunan y del Boletín de Sedimentos de Changjiang 2000-2018 (<http://www.cjw.gov.cn/zwzc/bmgb/nsgb/>). Los datos de las tres desembocaduras a lo largo de los años provienen del informe diario sobre la situación del agua en el sitio web del Departamento Provincial de Recursos Hídricos de Hunan (<https://slt.hunan.gov.cn/slt/hnsw/index.html>).

Métodos

Los siguientes métodos de investigación se aplican en este documento:

1. Red neuronal de propagación inversa. En la actualidad, las redes neuronales artificiales se han aplicado de forma amplia en el análisis



y simulación de sistemas de hidrología y recursos hídricos; el modelo de red neuronal artificial BP es el más utilizado (Karunanithi, Grenney, Whitley, & Bovee, 1994). La esencia del algoritmo BP es transformar un conjunto de problemas de ajuste de entrada-salida del sistema en un problema de optimización no lineal. El proceso de aprendizaje de las redes neuronales consiste en la propagación hacia adelante de las señales y la propagación hacia atrás de los errores. Los procesos de propagación hacia adelante y hacia atrás se alternan hasta que la salida del modelo de redes neuronales alcanza nuestras expectativas y la red alcanza la convergencia.

Tras la selección de la optimización de los parámetros de entrenamiento del modelo, los modelos de redes neuronales BP de escorrentía y sedimentos se entrenan con los datos de la muestra de entrada utilizando una red de tres capas. La capa de entrada del modelo neuronal artificial de escorrentía es la escorrentía de tres desembocaduras y cuatro ríos, con un total de nueve nodos. La salida del sistema es un nodo del transporte de sedimentos del lago en Chenglingji; el número de nodos de la capa oculta es nueve, y el paso máximo de entrenamiento se fija en 20 000 pasos; la capa de entrada del modelo de redes neuronales artificiales de transporte de arena es la escorrentía y el transporte de sedimentos de nueve estaciones de control hidrológico en tres desembocaduras y cuatro ríos. Se utiliza un total de 18 nodos para transportar los sedimentos; un nodo del lago de Chenglingji es la salida del sistema. El número de nodos de la capa oculta es de 19, y el tamaño máximo del paso de entrenamiento es de 20 000 pasos.

2. El método de prueba de tendencia de Mann-Kendall (M-K) se utiliza para probar y analizar la mutación de tendencia de datos de secuencias largas. Consulte la bibliografía para conocer el proceso de cálculo específico (Hu, Mao, Li, & Xu, 2014b). El método de prueba de tendencia M-K es ampliamente aceptado por los hidrólogos, porque no se espera que los datos de la materia prima obedezcan a una distribución de probabilidad específica y solo satisface la independencia estocástica de las series temporales.

En el caso de la hipótesis nula H_0 : ningún cambio en la serie temporal hidrológica de sedimentos, dejemos que la serie temporal $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$, para una muestra de n , construya una columna de orden m_i ; m_i representa el i -ésimo ejemplo $x_i > x_j$ ($1 \leq j \leq i$). El número acumulado define la estadística:

$$dk = \sum_{i=1}^k m_i, (2 \leq k \leq n)$$

Bajo la premisa de que la secuencia original es aleatoria e independiente, la media y la varianza de dk se definen como:

$$E[dk] = k(k - 1)/4$$

$$Var[dk] = k(k - 1)(2k + 5)/72, (2 \leq k \leq n)$$

Mayor normalización de dk , definición de estadísticas:

$$UF_k = \frac{dk - E[dk]}{\sqrt{\text{var}[dk]}}, (k = 1, 2, 3, \dots, n)$$

Invertir la serie temporal $x \{x_n, x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_1\}$, $UB_k = -UF_k (k = n, n-1, \dots, 1)$.

Las curvas UB_k y UF_k se cruzan en un punto determinado de la serie temporal, y el punto de intersección es el punto de mutación. Si el punto de mutación se encuentra entre el nivel de confianza del 95 % dado, el tiempo de mutación es estadísticamente significativo.

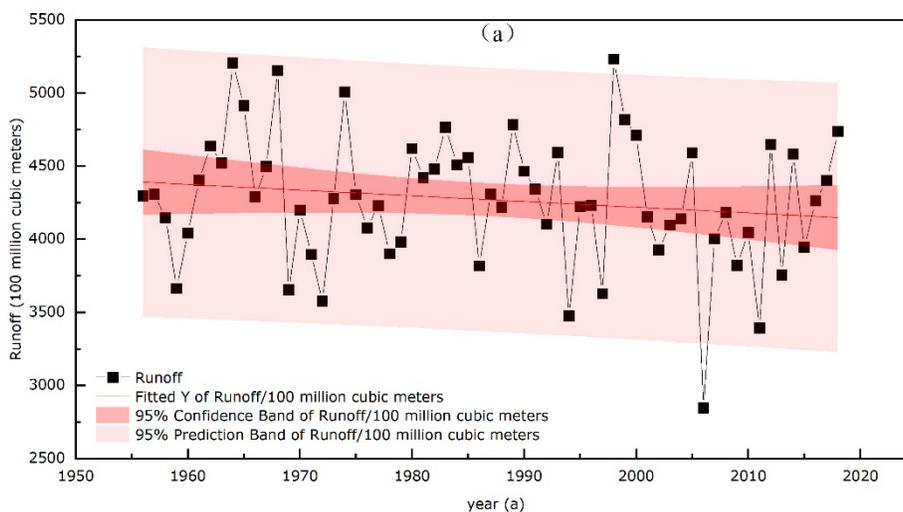
Resultados

Análisis de las características de evolución del agua y los sedimentos de la estación de Yichang

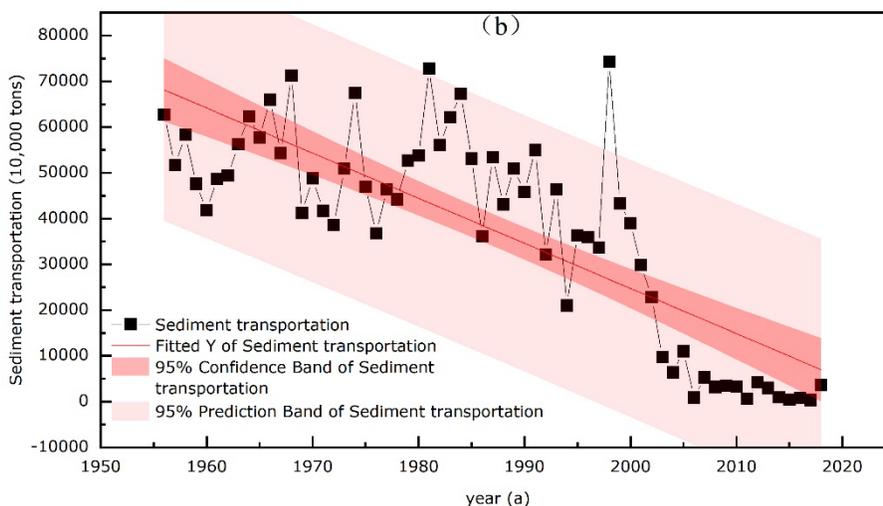
Escorrentía anual

La escorrentía media plurianual de la estación de Yichang desde 1956 hasta 2018 fue de $4\,271 \times 10^8 \text{ m}^3$; la escorrentía anual se encontraba en un estado de disminución fluctuante (Figura 2a). De los diferentes periodos de tiempo en que ocurren grandes perturbaciones humanas, la tendencia general es relativamente estable, salvo un descenso entre

2003-2018 ($4092 \times 10^8 \text{ m}^3$) tras el funcionamiento de la presa de las Tres Gargantas y durante el periodo de 1967-1972 ($4\ 164 \times 10^8 \text{ m}^3$) durante la fase de corte que ha disminuido. Por ejemplo, de 1956 a 1966 (antes del corte) era de $4\ 404 \times 10^8 \text{ m}^3$; de 1973 a 1980 (después del corte) fue de $4\ 301 \times 10^8 \text{ m}^3$; de 1981 a 2002 (después de la operación de Gezhouba) fue de $4\ 354 \times 10^8 \text{ m}^3$. La baja escorrentía entre 2003 y 2018 puede estar estrechamente relacionada con las escasas precipitaciones en los tramos superior y medio del río Yangtsé durante ese periodo. El análisis estadístico M-K mostró que la escorrentía anual de la estación de Yichang había fluctuado en los 63 años, pero siempre dentro del intervalo de confianza ($|U| < 1.96$, $\alpha = 0.05$), lo que indica que no se han producido cambios significativos en la escorrentía anual.



$y = (12035.5) + (-3.9075) * x$	
Runoff/100 million cubic meters	
Pearson's r	-0.1593
Adj. R-Square	0.0094
Intercept	12035.51615 ± 6161.18323
Slope	-3.9075 ± 3.10062



$y = (1.99671e+06) + (-985.99) * x$	
Sediment transportation	
Pearson's r	-0.79543
Adj. R-Square	0.62669
Intercept	1996709.54047 ± 191129.15104
Slope	-985.98968 ± 96.18578

Figura 2. La variación de la escorrentía anual y el transporte de sedimentos en la estación de Yichang durante 1956-2018.

Transporte anual de sedimentos

El valor medio anual del transporte de sedimentos en la estación de Yichang desde 1956 hasta 2018 es de 37548×10^4 t; la tendencia a la baja de la fluctuación es obvia, especialmente después de 2003 (Figura 2b). De diferentes periodos, el transporte anual de sedimentos mostró una tendencia a la baja, y fue de $54\,764 \times 10^4$ t de 1956 a 1966 (antes de doblar); $49\,300 \times 10^4$ t de 1967 a 1972 (durante el doblado); $49\,925 \times 10^4$ t en 1973-1980 (después de doblar); $45\,936 \times 10^4$ t de 1981 a 2002 (después de la operación de la presa de Gezhouba); solo $3\,583 \times 10^4$ t de 2003 a 2018 (después de la operación de la presa de las Tres Gargantas). El análisis estadístico M-K muestra que en los últimos 63 años la descarga anual de arena de la estación de Yichang presenta una tendencia descendente muy evidente. El punto de mutación se produjo en 2003 y superó el intervalo de confianza del 95 % en 1995. Se puede observar que tras el embalse del Proyecto de las Tres Gargantas, el transporte anual de sedimentos aguas abajo del embalse disminuyó de manera significativa.

Evolución de la escorrentía y del transporte de sedimentos en el lago Dongting

Escorrentía anual

La escorrentía y los sedimentos del lago Dongting proceden en gran medida de los cuatro ríos de Hunan (Xiang, Zi, Yuan, Li Río), y tres desembocaduras del río Jingjiang. Los datos medidos de escorrentía y sedimentos del lago Dongting desde 1956 hasta 2018 (Tabla 1) muestran que la escorrentía media hacia el lago es de $2\,446 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ procedente de las tres desembocaduras y los cuatro ríos, y el de Chenglingji es de $2\,753 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, de los cuales la afluencia de las tres desembocaduras es de $792 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, lo que representa el 28.78 % de la escorrentía total del lago; la escorrentía de los cuatro ríos es de $1\,654 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, lo que representa el 60.07 %; el intervalo de recarga es de $307 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, lo que representa el 11.15 % del agua total del lago. En la primera fase de explotación del Proyecto de las Tres Gargantas (1994-2002), la escorrentía media de los cuatro ríos era de $1\,908 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$; tras el funcionamiento del Proyecto de las Tres Gargantas (2003-2018), la escorrentía promedio de los cuatro ríos fue de $1\,604 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, y la tasa de atenuación fue del 15.93 %. La escorrentía media de las tres desembocaduras es de $616 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ en la fase inicial de explotación del embalse (1994-2002) y de $481 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ en el periodo posterior al embalse, con una tasa de disminución del 22.3 y del 39.3 %,



respectivamente, en comparación con las medias plurianuales. La escorrentía media del lago al principio del embalse de las tres gargantas era de $2\,748 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, mientras que la escorrentía media del lago después del embalse de las Tres Gargantas descendió a $2\,400 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$. La cantidad de escorrentía procedente de los cuatro ríos no ha cambiado mucho, mientras que la cantidad de agua que entra en tres desembocaduras ha disminuido significativamente. Prueba de tendencia M-K (Figura 3), los resultados muestran que la escorrentía de los cuatro ríos al lago no cambió de forma representativa, mientras que la escorrentía de las tres desembocaduras al lago cambió bruscamente en 1980 y disminuyó significativamente, lo que indica que la disminución de la cantidad de escorrentía en el lago Dongting se debe sobre todo a la fuerte disminución de la cantidad de escorrentía de las tres desembocaduras (Figura 4a).

Tabla 1. Estadísticas de escorrentía y sedimentos hacia y desde el lago Dongting durante 1956-2018.

Periodo estadístico/año	El volumen de escorrentía que entra en el lago/ 10^8 m^3			El volumen de escorrentía del lago/ 10^8 m^3	El volumen de sedimentos que entra en el lago/ 10^4 t			El volumen de sedimentos en el lago/ 10^4 t	La cantidad de sedimentación/ 10^4 t	velocidad de sedimentación /%
	Tres desembocaduras	Cuatro ríos	Tres desembocaduras + cuatro ríos		Tres desembocaduras	Cuatro ríos	Tres desembocaduras + cuatro ríos			
1956-1966	1 313	1 517	2 830	3 126	19 564	2 921	22 485	5 690	16 795	74.69
1967-1972	1 010	1 729	2 739	2 982	14 108	4 081	18 190	5 263	12 926	71.06
1973-1980	827	1 699	2 526	2 789	11 075	3 663	14 737	3 839	10 899	73.95
1981-2002	686	1 722	2 408	2 748	8 574	2 128	10 702	2 757	7 946	74.24
2003-2018	481	1 604	2 085	2 400	867	814	1 680	1 857	-177	-10.52
1956-2018	792	1 654	2 446	2 753	9 380	2 314	11 694	3 416	8 277	70.78

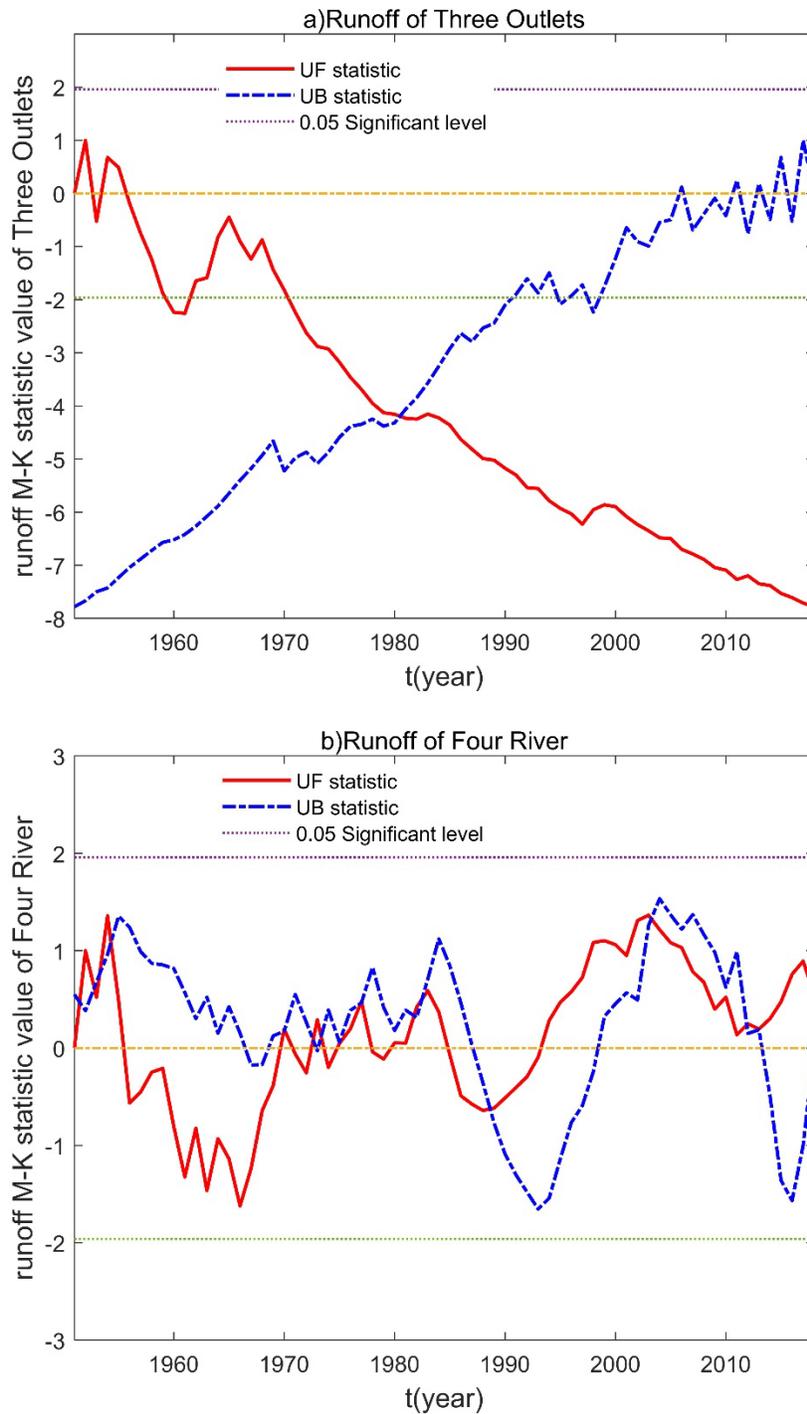


Figura 3. Las estadísticas de la prueba M-K de la escorrentía de tres desembocaduras y cuatro ríos.

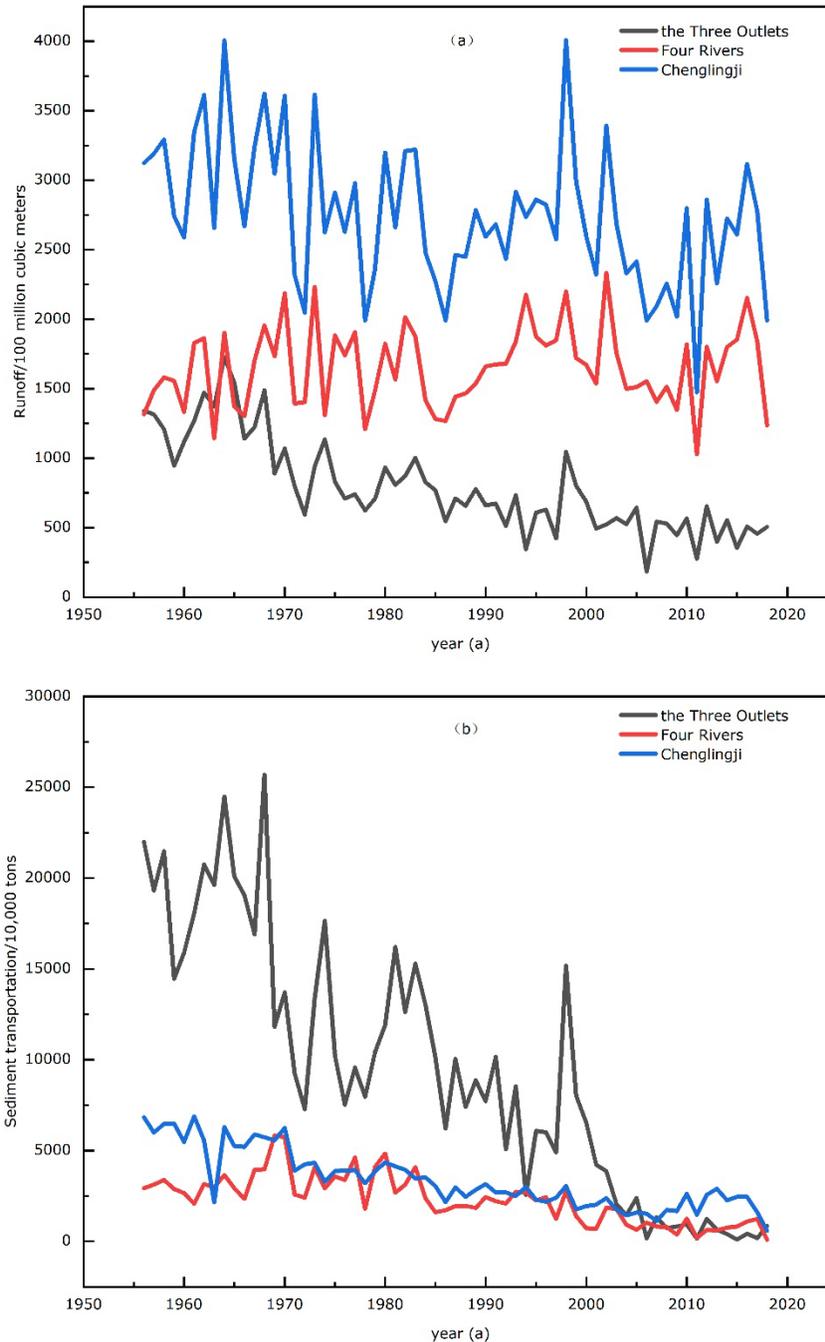


Figura 4. Tendencias de la escorrentía y el transporte de sedimentos en las tres desembocaduras, cuatro ríos y Chenglingji durante 1956-2018.

Transporte anual de sedimentos

El transporte de sedimentos medio plurianual de tres desembocaduras y cuatro ríos es de $11\,694 \times 10^4$ t/a, de las cuales el transporte de sedimentos de las tres desembocaduras al lago es de 9.380×10^4 t/a, lo que representa el 80.22 % del transporte total de sedimentos al lago; el transporte de sedimentos de cuatro ríos al lago es de $2\,314 \times 10^4$ t/a, lo que representa el 19.78 % del transporte total de sedimentos al lago. El transporte medio anual de sedimentos de Chenglingji fuera del lago es de $3\,416 \times 10^4$ t/a, y la cantidad anual de sedimentación del lago es de $8\,277 \times 10^4$ t/a, con una tasa de sedimentación del 70.78 %. Antes del embalse de las Tres Gargantas, la proporción de sedimento que ingresaba al lago en las tres desembocaduras era estable en 75-87 %. Después de que se incautó el embalse de las Tres Gargantas, debido al efecto de retención de sedimentos del embalse, la cantidad de sedimento en el embalse del río Jingjiang disminuyó y el sedimento que ingresa al lago en las tres desembocaduras se redujo de forma significativa. Durante el periodo de operación de Tres Gargantas (2003-2018), la cantidad de sedimento que ingresó al lago fue de solo 867×10^4 t/a, lo que representa el 51.57 % de la cantidad de sedimento que ingresa al lago, en comparación con el promedio de $6\,374 \times 10^4$ t/a en el periodo inicial de la operación Tres Gargantas (1994-2002); la atenuación es $5\,507 \times 10^4$ t/a, y la tasa de reducción es 86.40 %. Además, desde la perspectiva de los

cambios en la cantidad de sedimentos que entran y salen del lago a lo largo de los años (Figura 4b), la cantidad de sedimentos que sale del lago ha superado la cantidad de sedimentos en el lago desde 2006, y el lago Dongting comienza a cambiar de sedimentación a socavación, lo que indica que la operación del Proyecto de las Tres Gargantas tiene un efecto significativo en la interceptación de sedimentos río abajo, lo que reduce la sedimentación del lago Dongting hasta cierto punto.

Análisis de coherencia de la escorrentía anual y el transporte de sedimentos en las tres desembocaduras y Chenglingji

La Figura 5 muestra las curvas de doble acumulación de la escorrentía anual y del transporte de sedimentos desde tres desembocaduras hacia el lago Dongting y desde Chenglingji hacia fuera del lago, que muestran que la escorrentía y los sedimentos que entran y salen del lago Dongting han cambiado de modo importante en los últimos 63 años. Según la pendiente de la curva de doble acumulación, la pendiente K de la curva de doble acumulación de la escorrentía y los sedimentos que entran en el lago se atenúa de 14.4 en el primer periodo a 1.5 en el quinto periodo, con una tasa de decaimiento del 89.6 %; mientras que la pendiente K de la curva de doble acumulación de escorrentía y sedimentos disminuye de 1.8 en el primer periodo a 0.8 en el quinto, con una tasa de decaimiento

del 55.6 %. En particular, cabe señalar que la pendiente de la curva K de la arena del lago disminuyó de 12.1 a 1.5, lo que indica que el cambio de la arena del lago en el lago Dongting de 2003 a 2018 y la operación del agua de almacenamiento de las Tres Gargantas están estrechamente relacionados, y la tendencia de la curva de escorrentía y sedimentos fuera del lago no es fuerte. Se puede observar que la influencia del proyecto de conservación del agua del río Yangtsé sobre la escorrentía y los sedimentos que entran y salen del lago Dongting no está sincronizada, y la tasa de atenuación de los sedimentos que entran en el lago es mucho mayor que la de los sedimentos que salen de él.

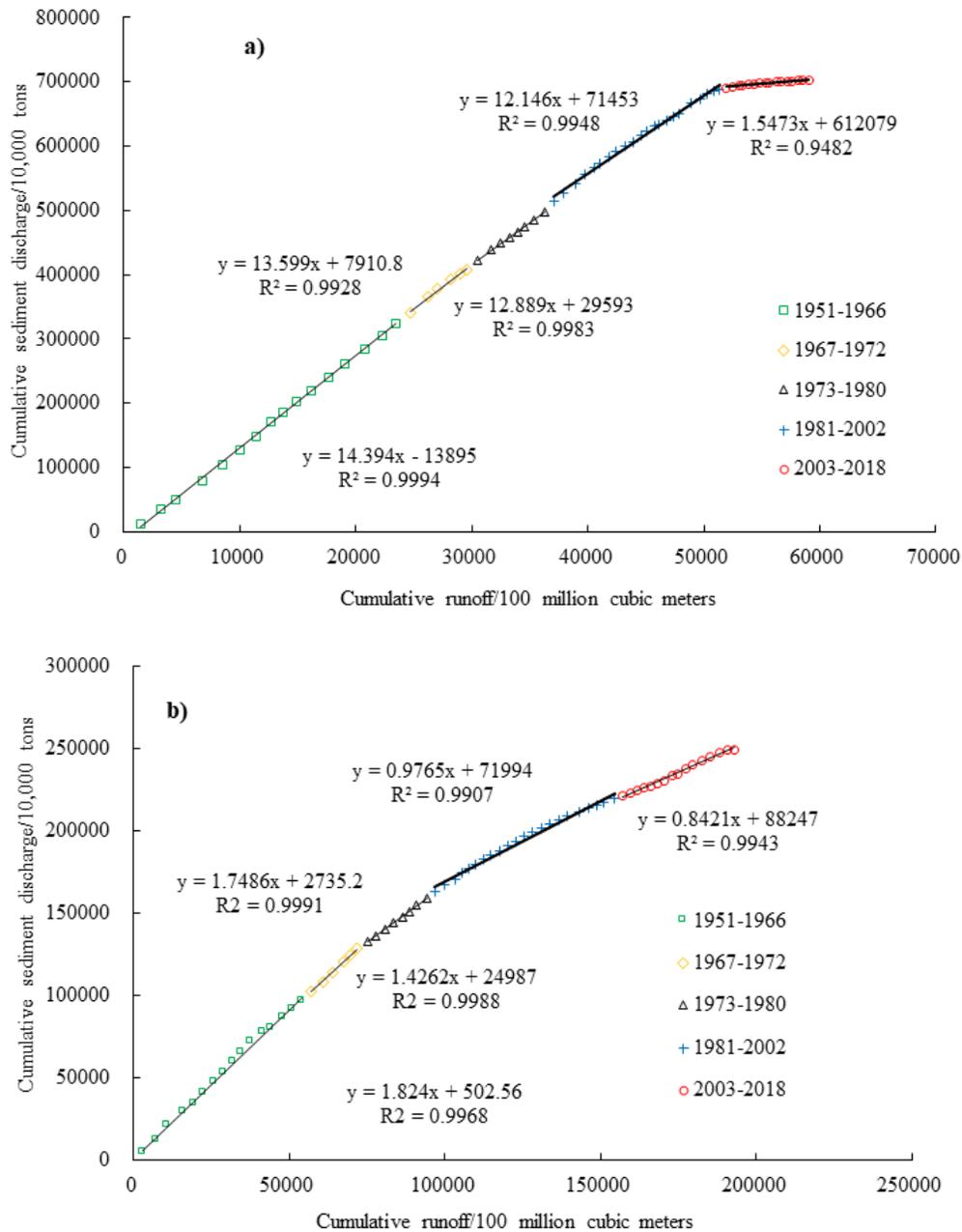


Figura 5. Doble curva acumulativa de escorrentía y sedimentos que entran y salen del lago Dongting: a) Escorrentía acumulada y sedimentos en el lago; b) Escorrentía acumulada y sedimentos fuera del lago.

Impacto de la operación del Proyecto de las Tres Gargantas en la relación entre el lago Dongting y el río Jingjiang

El 1º de junio de 2003, el Proyecto de las Tres Gargantas se bajó oficialmente para almacenar agua y empezó a funcionar a 135-139 m, lo que tuvo un profundo impacto en la relación entre las Tres Gargantas y el lago Dongting.

Impacto en la afluencia al lago desde tres desembocaduras

Variación de la esorrentía de las tres desembocaduras

La atenuación de la esorrentía y la distribución de sedimentos de tres desembocaduras es la causa directa del cambio de la esorrentía y los sedimentos en el lago Dongting. Con la curva de corte del bajo Jingjiang, la construcción de la presa de Gezhouba y el funcionamiento del embalse de las Tres Gargantas, la cantidad de esorrentía que entra en el lago Dongting procedente de las Tres Gargantas sigue disminuyendo. Antes del funcionamiento de la presa de las Tres Gargantas (1994-2002), la cantidad total de desvío de esorrentía de las Tres Gargantas era de



$616 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, mientras que durante la explotación de la presa de las Tres Gargantas (2003-2018), la escorrentía de las Tres Gargantas al lago Dongting ha descendido a $481 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, con una reducción del 22.00 %. El porcentaje total de desvío de las Tres Gargantas disminuyó del 29.82 % antes de la curva de corte del curso inferior del río Jingjiang al 11.77 % en la fase inicial de la explotación de las Tres Gargantas (Tabla 2). Entre ellos, el desvío de la escorrentía y el coeficiente de división del desagüe de Ouchikou presentan la tasa de atenuación más rápida de los tres desagües. De 1956 a 1966, su desviación media plurianual de escorrentía fue de $629 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$. De 2003 a 2018, su desvío de escorrentía medio plurianual fue de solo $105 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, que se redujo en un 83.3 %. El ratio de derivación correspondiente bajó del 14.29 al 2.58 %.

Tabla 2. Escorrentía y relación de división en la estación de Yichang y los tres puntos de venta durante diferentes periodos.

Estadísticas periodo	Escorrentía/ $\times 10^8 \text{ m}^3$					Relación de separación/%			
	Yichang estación	Songzikou	Taipingkou	Ouchikou	Escorrentía total de las tres desembocaduras	Songzikou	Taipingkou	Ouchikou	Escorrentía total de las tres desembocaduras
1956-1966	4404	479	205	629	1 313	10.87	4.66	14.29	29.82
1967-1972	4164	441	186	383	1 010	10.58	4.46	9.21	24.25
1973-1980	4301	423	160	244	827	9.83	3.72	5.68	19.23
1981-2002	4354	370	132	183	686	8.51	3.04	4.20	15.75
2003-2018	4092	294	82	105	481	7.18	2.01	2.58	11.77
1956-2018	4271	383	141	268	792	8.97	3.30	6.28	18.55

Las características y los cambios de tendencia del número de días secos de las tres desembocaduras

Tras la operación del Proyecto de las Tres Gargantas, el corte de las tres desembocaduras ha cambiado en diversos grados. Desde hace mucho tiempo, el sedimento del canal de inundación y la entrada en las tres desembocaduras del río Jingjiang se ha ido encenagando y reduciendo año tras año, por lo que las otras entradas (Shadaoguan, Guanjiapu, Kangjiagang y Mituosi) han sido cortadas año tras año durante el periodo seco, a excepción de una pequeña cantidad de desviación hacia el lago Dongting en el Xinjiangkou de Songzikou (Tabla 3 y Figura 6); el número de días secos en los tres puntos de venta mostró una tendencia creciente. En los últimos años, el tiempo de flujo seco de Tres Gargantas se ha mantenido entre 5 y 6 meses cada año, y el tiempo promedio de flujo seco de la estación Kangjiagang ha superado los ocho meses durante muchos años. Según las estadísticas de 2003 a 2018, el promedio anual de días de desecación en Shadaoguan, Mituosi, Guanjiapu y Kangjiagang ha alcanzado los 186, 138, 175 y 269 días, respectivamente, en comparación con el promedio de varios años, el número de días secos aumentó en 70, 34, 44 y 20 días, respectivamente. Entre ellos, en 2006, debido a factores globales como las escasas precipitaciones en la parte alta del río Yangtsé y el almacenamiento de agua en el Proyecto de las Tres Gargantas, el número de días de sequía en tres desembocaduras fue el más alto de los últimos años, y el número de días de sequía en

Shadaoguan, Mituosi, Guanjiapu y Kangjiagang alcanzó los 269, 206, 235 y 336 días, respectivamente. La época de corte se produce principalmente en meses secos, como enero-abril y noviembre-diciembre, lo que coincide con el periodo de operaciones de ajuste y reposición del Proyecto de las Tres Gargantas. Por lo tanto, en función de la duración de la estación seca, es necesario optimizar el esquema de despacho de reposición de agua del embalse de las Tres Gargantas, al tiempo que se garantiza la demanda para la generación de energía, la navegación y el riego durante el periodo seco del embalse, al igual que aumentar el caudal de descarga del embalse a su debido tiempo o predescargarlo con antelación, para aumentar la escorrentía del tramo Yichang-Zhicheng del río Yangtsé, y garantizar la seguridad de la producción industrial y agrícola y del agua doméstica en la zona del lago Dongting.

Tabla 3. Variación de la media de días secos en las tres desembocaduras durante distintos periodos.

Periodo estadístico	Media anual plurianual de días de sequía en cada estación de las tres desembocaduras por periodo (d)				El caudal correspondiente de la estación de Zhicheng cuando se corta el caudal en cada estación (m ³ /s)			
	Shadaoguan	Mituosi	Guanjiapu	Kangjiagang	Shadaoguan	Mituosi	Guanjiapu	Kangjiagang
1956-1966	0	36	18	212	/	4 292	3 925	13 070
1967-1972	0	3	80	240	/	3 470	4 958	15 950
1973-1980	75	70	145	257	4 660	5 180	7 790	18 350
1981-2002	172	155	167	252	8 920	7 676	8 665	17 390
2003-2018	186	138	175	269	10 824	7 321	8 788	14 500
1956-2018	117	104	131	248	8 594	5 932	7 337	16 000

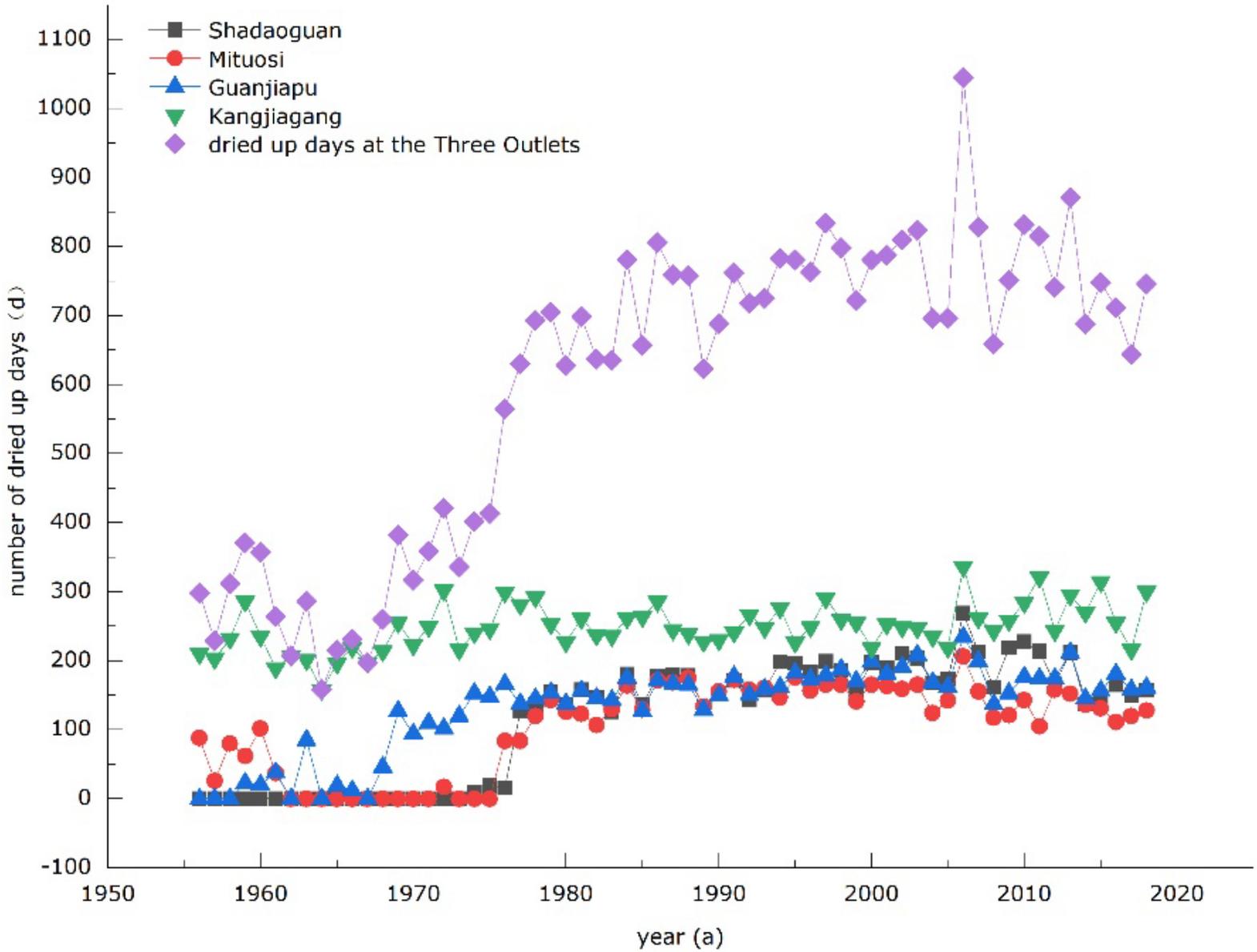


Figura 6. Tendencia de los días de desecación en las tres desembocaduras del río Jingjiang.

Para revelar de forma más intuitiva el cambio de tendencia del número de días de sequía de tres desembocaduras, utilizando el método de prueba de tendencia M-K, tomando como nodo el proyecto hidroeléctrico a gran escala en la corriente principal del río Yangtsé, el número de días de desecación de las tres desembocaduras se ha dividido en seis etapas. La primera etapa es de 1951 a 1958 (el bloqueo de Tiaoxiankou), y el valor de la prueba de correlación de rangos de Kandel es $|U| = 1.359 < U(0.05/2) = 1.96$, el número de días de sequía tiene una tendencia al alza, pero no es significativa. En la segunda etapa, de 1959 a 1973 (el periodo de tala del río Jingjiang inferior), el valor de la prueba de correlación de rangos de Kandel $|U| = 1.039 < U(0.05/2) = 1.96$ muestra una tendencia ascendente, pero la tendencia no es obvia, y puede verse que el bloqueo de Tiaoxiankou no tiene un impacto fundamental en la interrupción de tres puertos. En la tercera etapa, de 1974 a 1981 (presa de Gezhouba para generación de energía), los valores de prueba relevantes del rango de Kandel fueron $|U| = 2.473 > U(0.05/2) = 1.96$, el número de días de sequía mostró una tendencia creciente, y la tendencia creciente fue significativa, lo que indica que el Proyecto de Corte del Bajo Jingjiang tuvo un impacto significativo en la interrupción de las tres desembocaduras. En la cuarta etapa, de 1982 a 2003 (antes del embalse de las Tres Gargantas), el valor de la prueba de correlación de rangos de Kandel $|U| = 3.016 > U(0.05/2) = 1.96$, el número de días secos de tres desembocaduras mostró una tendencia significativamente creciente, lo que indica que la construcción de Gezhouba tiene un alto impacto en la interrupción de tres desembocaduras. En la quinta etapa,

de 2004 a 2018 (el periodo de funcionamiento del embalse de las Tres Gargantas), el valor de la prueba de correlación de rangos de Kendall $|U| = 0.842 < U(0.05/2) = 1.96$, el número de días de interrupción de las tres desembocaduras tiene una tendencia creciente, pero la tendencia no es significativa, lo que indica que el almacenamiento de agua del embalse de las Tres Gargantas no ha tenido un impacto fundamental en la interrupción de las tres desembocaduras. En un análisis exhaustivo, el número de días de desecación de las tres desembocaduras mostró una tendencia creciente de 1956 a 2018, pero la tendencia creciente no fue significativa de 2004 a 2018, lo que indica que el aumento del número de días de desecación de las tres desembocaduras se ha ralentizado desde el funcionamiento del embalse de las Tres Gargantas. Esto demuestra que el despacho del embalse de las Tres Gargantas durante el periodo seco tiene un efecto evidente de reabastecimiento del volumen de agua aguas abajo, lo que es beneficioso para la estabilidad de la escorrentía de las tres desembocaduras.

Efecto sobre el cambio de la erosión y la sedimentación en el lago Dongting

A partir de los datos estadísticos de sedimentos de 1956 a 2018 y de la línea del proceso de sedimentación del lago Dongting (Figura 7), es evidente que la distribución de sedimentos en tres desembocaduras se ha contraído de forma relevante bajo la influencia del Proyecto de las Tres



Gargantas. La deposición de sedimentos en el lago Dongting mostró una clara tendencia a la baja, y la cantidad media anual de deposición de sedimentos ha disminuido de $11\,155 \times 10^4$ t/a antes de la operación de las Tres Gargantas (1956-2002) a 29×10^4 t/a durante el periodo de operación de las Tres Gargantas (2003-2018), con una disminución del 99.8 %. La tasa de deposición de sedimentos disminuyó del 72.01 % antes de la operación de las Tres Gargantas al -43.38 % durante la operación de las Tres Gargantas. En 2006, el volumen de sedimento que salía del lago era de $1\,520 \times 10^4$ t, y la cantidad de sedimento procedente de las tres desembocaduras y los cuatro ríos era de $1\,188 \times 10^4$ t, ignorando la cantidad de sedimento procedente del intervalo, el lago Dongting empezó a convertirse en un lago de lavado en 2006, excepto por la ligera sedimentación en 2007 y 2018; el lago Dongting mostró un estado de erosión de 2008 a 2017. En la Figura 7 se puede observar que la cantidad de sedimentación del lago Dongting ha ido disminuyendo año tras año, especialmente tras el funcionamiento de la presa de las Tres Gargantas, la baja ha mostrado una tendencia creciente, y en 2006 se produce un cambio repentino.

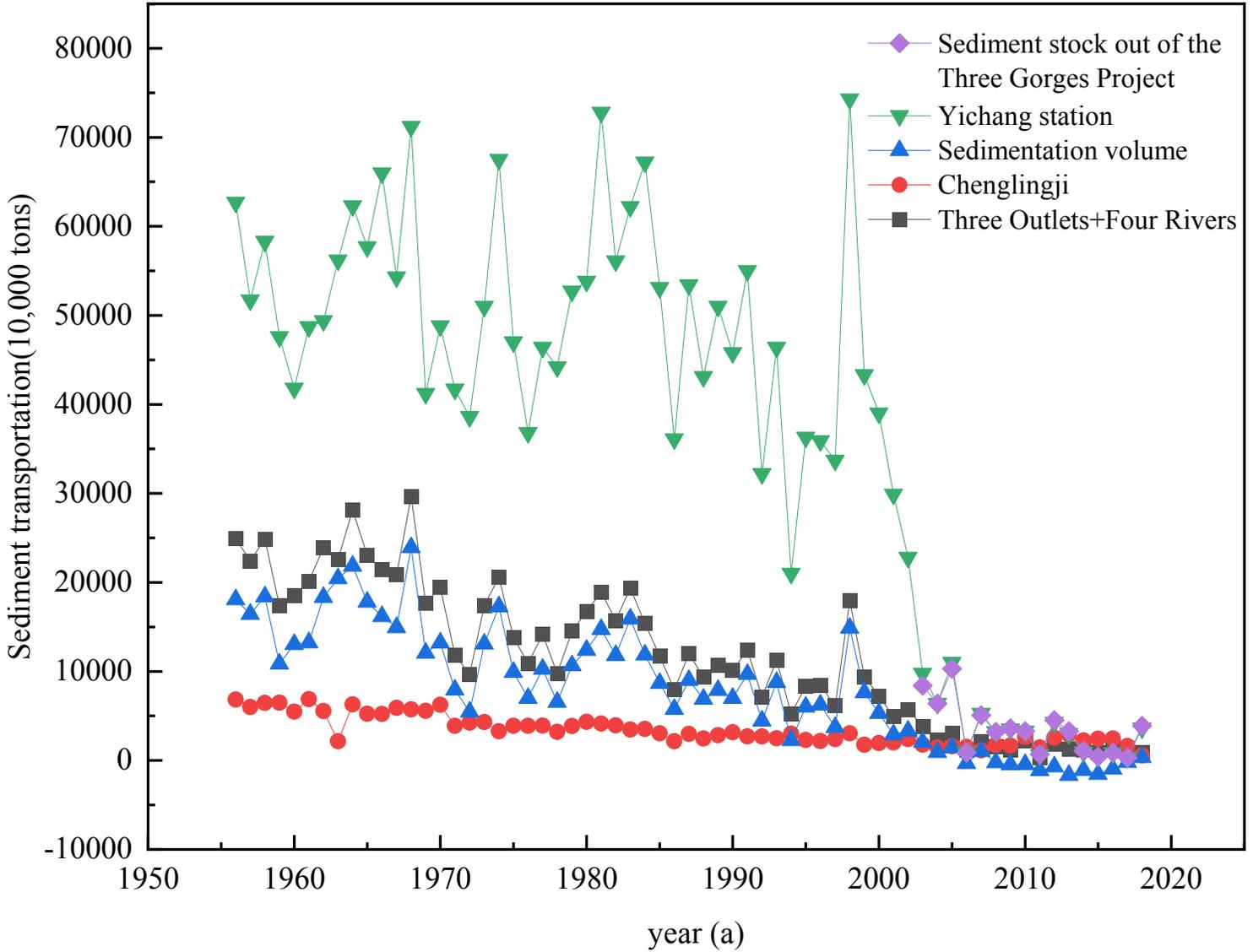


Figura 7. Línea de proceso de la deposición de sedimentos en el lago Dongting de 1956 a 2018.

La cantidad media anual de sedimentos que entra en el lago por las tres desembocaduras del río Jingjiang disminuyó de $19\,590 \times 10^4$ t y $6\,960 \times 10^4$ t en 1956-1966 y 1996-2002 a 867×10^4 t en 2003-2018, con reducciones del 95.6 y 87.6 %, respectivamente. Sin tener en cuenta el intervalo de entrada de sedimentos, el flujo medio anual de sedimentos en el lago Dongting fue de $1\,917.65 \times 10^4$ t en los 15 años posteriores al funcionamiento del Proyecto de las Tres Gargantas, lo que supone el 16.4 % de la entrada media plurianual de sedimentos de $11\,694 \times 10^4$ t. De 2003 a 2018, el volumen de sedimentación acumulado del lago Dongting fue de $-2\,829 \times 10^4$ t, mostrando un estado de erosión que fue $55\,154 \times 10^4$ t menor que el volumen de sedimentación acumulado de $52\,325 \times 10^4$ t de 1994 a 2002, con una reducción del 105.4 %.

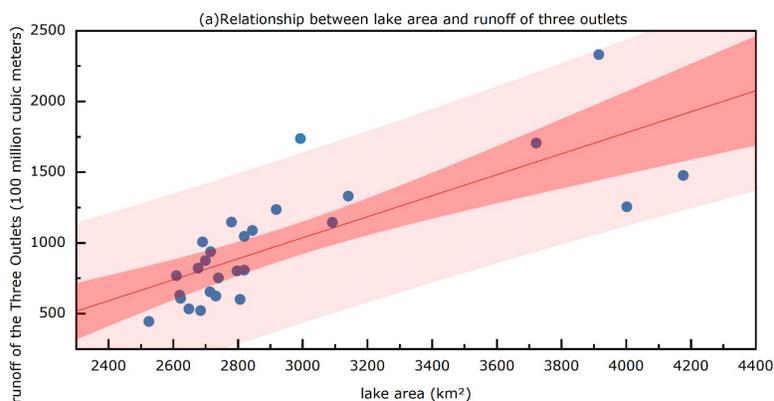
Efectos en los cambios de superficie y volumen del lago Dongting

Tres desembocaduras y los cuatro ríos son las principales fuentes de escorrentía y sedimentos del lago Dongting. Debido a la escasa cantidad de escorrentía y a la variación de sedimentos en cuatro ríos, la escorrentía y la variación de sedimentos en tres desembocaduras tienen un efecto significativo en el lago Dongting (Hu *et al.*, 2013; Hu & Zhang, 2018). Al comparar y analizar la relación entre la cantidad de agua y sedimentos en las tres desembocaduras del río Jingjiang, y la superficie y el volumen del lago en diferentes años, se observa que existe una correlación positiva



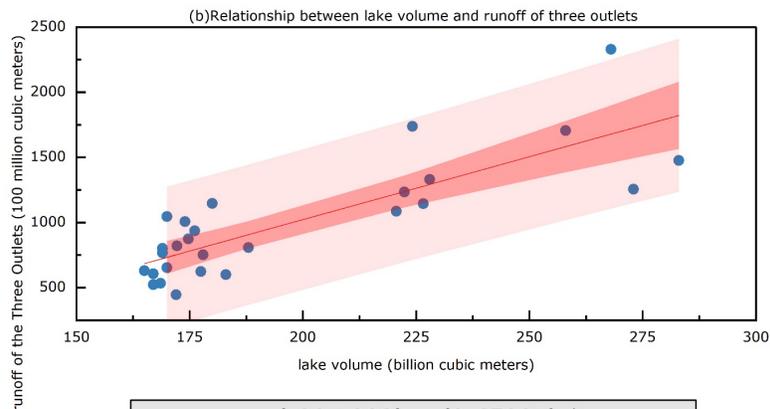
entre la escorrentía y la descarga de sedimentos de las tres desembocaduras del río Jingjiang, y la superficie y el volumen del lago Dongting (Figura 8a-d). Según los datos medidos del lago Dongting, su superficie pasó de 6 000 km² en 1852 a 4 350 km² en 1949, lo que supone una reducción de 1 650 km². Durante los 63 años transcurridos entre 1949 y 2012, la superficie del lago disminuyó un 37.6 %, y su volumen, un 42 %. El mayor lago de agua dulce del país se ha convertido en el segundo mayor lago de agua dulce. A partir de los datos estadísticos de la superficie del lago Dongting, se puede observar que durante el periodo comprendido entre 1825 y 2012, la superficie del lago Dongting mostró una tendencia continua a la baja, con una superficie mínima que se redujo a 2 525 km². De 1949 a 1982, su contracción cambió de modo relevante; la tasa de contracción anual del lago fue la mayor en 1954-1958, alcanzando los 10 km²/a, lo que estaba relacionado con un gran número de recuperaciones del lago en esta etapa. De 1977 a 2012, el volumen del lago fue de 165-178×10⁸ m³. En 1998, la superficie y el volumen del lago repuntaron. Según las estadísticas del Departamento Provincial de Recursos Hídricos de Hunan, desde 1998, el lago Dongting puso en marcha el proyecto de devolución de tierras al lago, y la capacidad de almacenamiento de inundaciones aumentó en 27×10⁸ m³, ampliando el área de almacenamiento de inundaciones a 554 km², y la superficie del lago está creciendo. En 2003, el embalse de las Tres Gargantas fue almacenado y puesto en funcionamiento, y las tres desembocaduras del río Jingjiang liberaron el agua limpia del río Yangtsé. El efecto de que el lago Dongting pasara de la sedimentación a la socavación fue evidente, y

la superficie del lago Dongting se siguió incrementando. En general, la atenuación del agua y los sedimentos es un factor importante que conduce a la reducción de la superficie y el volumen del lago, pero no es el único factor influyente. El reciclaje de lagos para la recuperación de tierras o la devolución de tierras a los lagos también tiene un impacto significativo en la superficie o el volumen del cuerpo de agua.



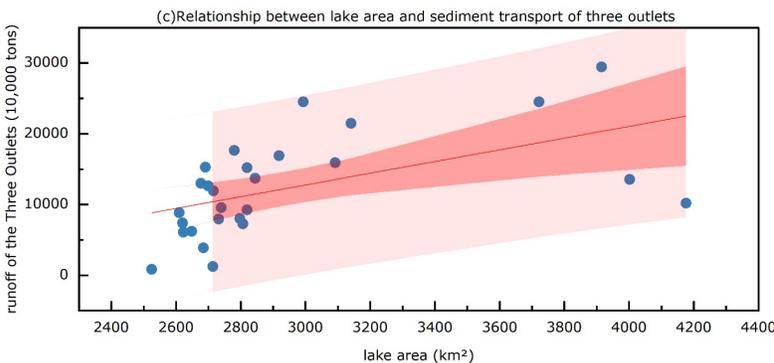
$$y = (-1190.41) + (0.742277) * x$$

	runoff of the Three Outlets
Pearson's r	0.76857
Adj. R-Square	0.57432
Intercept	-1190.40569 ± 368.06204
Slope	0.74228 ± 0.12358



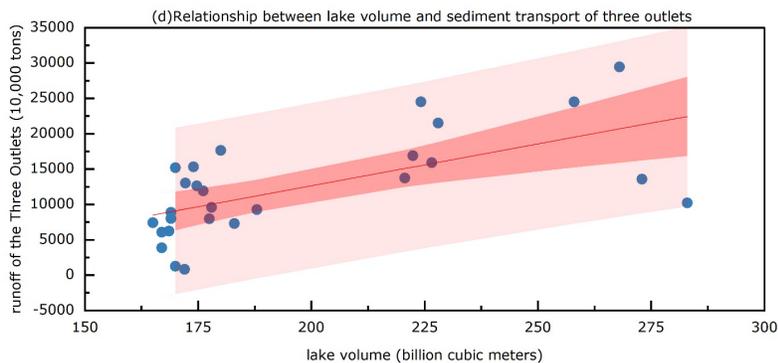
$$y = (-907.992) + (9.65097) * x$$

	runoff of the Three Outlets
Pearson's r	0.82071
Adj. R-Square	0.6605
Intercept	-907.99172 ± 269.55996
Slope	9.65097 ± 1.34373



$$y = (-12057.4) + (8.27536) * x$$

	runoff of the Three Outlets
Pearson's r	0.53712
Adj. R-Square	0.26004
Intercept	-12057.39484 ± 7741.32499
Slope	8.27536 ± 2.59916



$$y = (-11001.6) + (118.206) * x$$

	runoff of the Three Outlets
Pearson's r	0.63013
Adj. R-Square	0.37294
Intercept	-11001.58755 ± 5844.16722
Slope	118.20614 ± 29.13266

Figura 8. Relación entre la superficie, el volumen del lago Dongting y la escorrentía, y el transporte de sedimentos en las tres desembocaduras.

Predicción de cambios en la escorrentía y el transporte de arena fuera del lago Dongting

De acuerdo con los datos secuenciales a largo plazo de la escorrentía y la descarga de sedimentos de tres desembocaduras y el Chenglingji, se construyó un modelo de red neuronal BP para entrenar y analizar la escorrentía y la emisión de sedimentos del lago Dongting. En la simulación se estableció un modelo de predicción de red neuronal BP para la predicción de la escorrentía anual y la entrega anual de sedimentos. Los resultados de la simulación se muestran en la Figura 9.

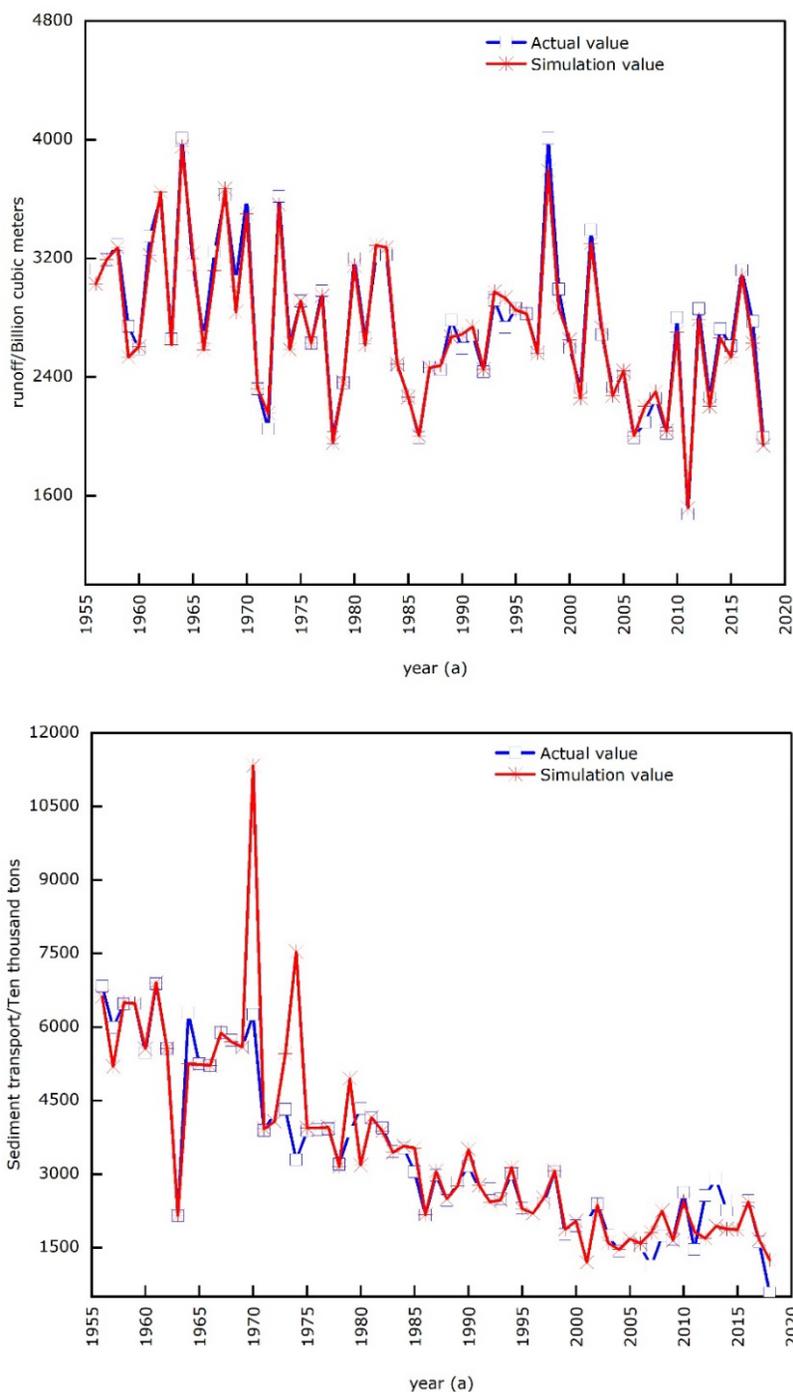


Figura 9. Resultados del ajuste de la red BP sobre la escorrentía anual y el transporte de sedimentos.

Según los resultados de los cálculos del modelo, los porcentajes medios de error de la escorrentía anual y de la descarga anual de sedimentos son del 0.65 y del 5.16 %, respectivamente (Tabla 4). Puede observarse que los resultados de la predicción de la escorrentía son ideales, y los porcentajes de error se sitúan entre el 0.02 y 7.59 %. Sin embargo, debido a la gran variación interanual de la descarga de sedimentos, los resultados de la predicción de la descarga de sedimentos son peores que los resultados de la predicción de la escorrentía, y los errores de los datos en años individuales son mayores.

Tabla 4. Comparación de los valores medidos y previstos de la escorrentía y los sedimentos de la cuenca del lago Dongting tras el funcionamiento del embalse de las Tres Gargantas.

Tiempo transcurrido desde la construcción del embalse (año)	Escorrentía ($\times 10^8 \text{ m}^3$)			Transporte de sedimentos ($\times 10^4 \text{ t}$)		
	Valor medido	Valores simulados	Porcentaje de error	Valor medido	Valores simulados	Porcentaje de error
1	2 685	2 728.47	1.62	1 750	1 592.08	-9.02
2	2 329	2 274.75	-2.33	1 430	1 460.64	2.14
3	2 415	2 441.06	1.08	1 590	1 676.12	5.42
4	1 990	2 003.94	0.70	1 520	1 586.37	4.37
5	2 094	2 201.38	5.13	1 120	1 806.07	61.26
6	2 256	2 299.70	1.94	1 740	2 247.50	29.17
7	2 018	2 035.58	0.87	1 670	1 642.87	-1.62
8	2 799	2 702.60	-3.44	2 620	2 438.32	-6.93
9	1 475	1 515.60	2.75	1 460	1 819.62	24.63
10	2 860	2 788.02	-2.52	2 560	1 687.99	-34.06
11	2 259	2 202.44	-2.50	2 900	1 934.93	-33.28
12	2 725	2 662.61	-2.29	2 260	1 876.50	-16.97
13	2 610	2 533.36	-2.94	2 450	1 868.12	-23.75
14	3 119	3 085.88	-1.06	2 460	2 432.35	-1.12
15	2 776	2 626.53	-5.38	1 610	1 664.66	3.40
16	1 990	1 936.04	-2.71	575	1 247.27	116.92
17		2 041.45			335.46	
18		2 138.85			216.19	
19		2 153.68			259.90	
20		2 198.67			303.85	
21		2 238.43			367.12	

Después de la construcción del embalse de las Tres Gargantas se interceptó una gran cantidad de sedimentos en el embalse, y el lecho del río aguas abajo de la presa sufrió una evidente erosión. Según el cálculo de los valores medidos y simulados de la escorrentía y el transporte de sedimentos en el lago Dongting, se observa que, tras 16 años de funcionamiento de las Tres Gargantas, el lecho de la corriente principal del Yangtsé ha sufrido una gran erosión, el nivel del agua ha descendido, la separación de sedimentos de las Tres Gargantas ha seguido disminuyendo y el coeficiente de desviación de la escorrentía de las Tres Gargantas ha pasado del 22.26 % antes de la explotación al 11.77 % después de la explotación. En términos de volumen de transporte de sedimentos, después de la operación de embalse de las Tres Gargantas, el volumen de transporte de sedimentos en la estación de Yichang cayó bruscamente de $37\,356 \times 10^4$ t (1994-2002) antes de la operación a $3\,583 \times 10^4$ t (2003-2018) después de la operación, y la capacidad de transporte de sedimentos de las tres desembocaduras se redujo bruscamente a 467×10^4 t, 119×10^4 t y 280×10^4 t, respectivamente. Es evidente que la finalización del embalse de las Tres Gargantas ha tenido un efecto significativo en la interceptación de sedimentos que entran en el lago Dongting.

La Tabla 4 presenta las previsiones para 21 años después de la finalización del embalse de las Tres Gargantas. Esto demuestra que el efecto de bloqueo del embalse de las Tres Gargantas sobre los sedimentos es evidente. Debido a la evidente atenuación de la cantidad de sedimento que entra en el lago por las tres desembocaduras del río Jingjiang, la

cantidad de sedimento que fluye fuera del lago Dongting también ha disminuido de manera importante. Se prevé que la cantidad de sedimentos que saldrá del lago desde Chenglingji en 2023 solo será de 367.12×10^4 t. Sin embargo, la esorrentía de salida del lago disminuirá de forma relativamente constante, y el caudal de salida del lago se mantendrá en torno a $2\,238.43 \times 10^8$ m³ en 2023.

Conclusiones y debate

Conclusiones

De acuerdo con las últimas observaciones de agua y arena disponibles en el área del lago Dongting, se presenta un análisis de las características de variación de la esorrentía y los sedimentos en el lago Dongting y la interrelación entre ríos y lagos, el impacto del almacenamiento del embalse de las Tres Gargantas en la relación entre el lago Dongting y tres desembocaduras, y se extraen las siguientes conclusiones principales:

1. Desde la perspectiva de las escalas interanual e interdecenal, la fuerte reducción de la cantidad de esorrentía procedente de tres desembocaduras es la principal responsable de la disminución de la esorrentía en el lago Dongting. El embalse de la presa de las Tres Gargantas tiene un importante efecto de interceptación de los sedimentos aguas abajo. Por lo tanto, disminuye el grado de sedimentación en el lago

Dongting. Las actividades humanas, como el Proyecto de las Tres Gargantas y la baja de las precipitaciones en los tramos superiores del río Yangtsé son las que más afectan al lago.

2. Analizando la coherencia de la escorrentía y el transporte de sedimentos dentro y fuera del lago Dongting, se observa que el impacto de los proyectos de conservación del agua en la corriente principal del río Yangtsé sobre el agua, y los sedimentos que entran y salen del lago Dongting es asíncrono, y la tasa de atenuación y cambio de los sedimentos que entran en el lago es mucho mayor que la de los sedimentos que salen de él.

3. A partir de las características y los cambios de tendencia del número de días sin caudal en tres desembocaduras, se observa que las condiciones cambiantes del entorno han provocado un fuerte descenso de la escorrentía y el desvío de sedimentos de tres desembocaduras como consecuencia del cambio de la cuenca del lago Dongting. Las tres desembocaduras se están encenagando gradualmente, y el río Ouchi y el río Hudu están disminuyendo de manera lenta.

4. Desde la perspectiva de la línea de proceso de deposición de sedimentos en el lago Dongting, la deposición de sedimentos acumulada en el lago Dongting de 2003 a 2018 fue de -2.829×10^4 t, y el área del lago cambió de deposición a erosión.

5. El modelo de red neuronal BP se utilizó para simular la cantidad de escorrentía y sedimentos del lago Dongting; los resultados

mostraron que la precisión de la simulación satisfacía las necesidades de predicción del agua y los sedimentos del lago Dongting.

Discusión

Los cambios en la relación entre el río Jingjiang y el lago Dongting son de gran importancia para el control de inundaciones del curso medio del río Yangtze. Debido a la influencia de la curvatura del río Jingjiang, la construcción de la presa de Gezhou y el embalse de las Tres Gargantas, la relación entre el agua y los sedimentos en el río Jingjiang y el lago Dongting es cada vez más complicada.

1. El proceso de esorrentía y sedimentos procedentes de las tres desembocaduras del río Jingjiang y los cuatro ríos es complejo, y las crecidas de distintas fuentes forman un efecto de apoyo mutuo con el lago Dongting, lo que da lugar a un complicado proceso de variación del agua y los sedimentos, que agrava la situación del control de crecidas en la zona del lago Dongting. La reducción de la distribución de sedimentos en las tres desembocaduras del río Jingjiang se debe sobre todo al descenso del nivel del agua del río Jingjiang y al cambio de la corriente de los canales de inundación de las tres desembocaduras, que tiene su origen en el cambio del agua y los sedimentos en la corriente principal del río Yangtsé. Además de la flexión del río Jingjiang y el embalse de las Tres Gargantas, la construcción de las centrales hidroeléctricas de Wudongde, Baihetan, Xiluodu y Xiangjiaba tuvo un gran impacto en el desvío de las

tres desembocaduras. La capacidad total de almacenamiento de las cuatro centrales hidroeléctricas supera la del embalse de las Tres Gargantas, alcanzando los $136 \times 10^8 \text{ m}^3$. En particular en los años secos, la situación del flujo seco de las tres desembocaduras es más grave, a lo que hay que prestar atención y tomar contramedidas para reducir el impacto del flujo seco de las tres desembocaduras en el volumen de agua del lago Dongting.

2. Los distintos proyectos de conservación del agua tienen diferentes repercusiones en la relación entre la escorrentía y los sedimentos en el río Jingjiang y el lago Dongting. La curvatura del río Jingjiang ha provocado un fuerte descenso del desvío de las tres desembocaduras, y el tramo del río Jingjiang se ha erosionado enormemente, lo que ha reducido la cantidad de escorrentía y sedimentos que entran en el lago por las tres desembocaduras, ralentizando la deposición del lago Dongting. Sin embargo, con el aumento de la cantidad de escorrentía y sedimentos en el curso bajo del río Jingjiang, ha aumentado el papel de apoyo de este río en la desembocadura del lago Dongting, lo que complica la relación entre los ríos y los lagos. El embalse de las Tres Gargantas también provoca la erosión del río Jingjiang. La diferencia es que el nivel del agua del río Jingjiang causado por el almacenamiento de la presa de las Tres Gargantas no bajó mucho, pero el efecto de interceptación de sedimentos de la presa de las Tres Gargantas fue evidente, lo que redujo en gran medida la sedimentación del lago Dongting.

Se trata de un estudio sistemático a largo plazo para averiguar cómo influye la presa de las Tres Gargantas en la escorrentía y los sedimentos del lago Dongting, ya que no se dispone de datos sobre el proceso de escorrentía y sedimentos del embalse de las Tres Gargantas a lo largo de los años ni de datos de mapas topográficos del fondo del lago Dongting. La relación entre los ríos y los lagos, así como entre los sedimentos, es bastante compleja. El estudio del acoplamiento de la explotación del embalse de las Tres Gargantas, y el cambio de la escorrentía y los sedimentos en el lago Dongting, así como el estudio de la erosión del suelo y los cambios de sedimentación en el lago Dongting solo implican estadísticas cuantitativas. Los investigadores acaban de empezar a estudiar el impacto de la explotación del embalse de las Tres Gargantas en las tres desembocaduras y el lago Dongting, y se necesitan más pruebas de datos observacionales para respaldar los resultados estadísticos pertinentes. Nuestro objetivo es realizar estudios de acoplamiento espacial con datos completos y seguir de cerca los cambios de escorrentía y sedimentos en tres desembocaduras en relación con la evolución de la cuenca. Garantizar la estabilidad a largo plazo de la cuenca del lago Dongting coordinando los calendarios de funcionamiento de los embalses y del lago Dongting, y aplicar a tiempo medidas de control de inundaciones y de dragado.

Agradecimientos

Gracias al profesor Mao Dehua por sus valiosas revisiones durante la redacción del documento. Proyecto de financiación: Proyecto del Fondo



de Humanidades y Ciencias Sociales del Ministerio de Educación (19YJCZH053); Proyecto General del Departamento Provincial de Educación de Hunan (19C0592); Fondo del Comité de Revisión de Logros en Ciencias Sociales de la Provincia de Hunan (XSP20YBC296); Proyecto de Investigación en Ciencias Sociales de la Ciudad de Zhuzhou (ZZSK2021043); Proyecto del Plan de Ciencia y Tecnología de Zhuzhou.

Dos proyectos adicionales están financiados por las siguientes subvenciones: Hunan Provincial Social Science Achievement Review Committee Project (Characteristics of Spatial and Temporal Differentiation of Nitrogen and Phosphorus Pollution in Cultivated Land Across Administrative Regions and Synergistic Paths of Governance, XSP24YBC383); y Dali University Ph.D. Research Initiation Fee Project (Study on Influencing Factors and Driving Mechanisms of Rural Tourism Development--Taking the West Yunnan Tourism Loop as an Example, KY24YBC383). Tourism Loop, KY2419121740).

Referencias

Ban, X., Jiang, L., Zeng, X., Du, Y., Xiao, F., & Ling, F. (2014). Quantifying the spatio-temporal variation of flow and sediment in the middle Yangtze River after the impoundment of the Three Gorges. *Advances in Water Science*, 25(5), 650-657 (in Chinese). DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2014.05.014

- Chen, Y. (2016). The variation and response of water and sediment exchange between Yangtze River and Dongting Lake after the Three Gorges reservoir impoundment (dissertation). Beijing, China: China Institute of Resources & Hydropower Research (in Chinese).
- Dai, W., Lu, D., Li, J., & Wang, J. (2017). Evolution characteristics and driving factors of runoff and sediment changes in Dongting Lake During 1951-2014. *Journal of Soil and Water Conservation*, 31(2), 142-150, 176 (in Chinese). DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.02.025
- Deng, C., Zhong, X., Xie, B., Wan, Y., & Song, X. (2019). Spatial and temporal changes of land ecosystem service value in Dongting Lake area in 1995-2015. *Geographical Research*, 38(4), 844-855 (in Chinese). DOI: 10.11821/dlyj020170999
- Guo, X., Yao, S., & Yan, L. (2011). Variation of Split flow and sediment diversion at the three outlets along Jingjiang River and water and sediment transport at the outlet of Dongting Lake. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 28(8), 80-86 (in Chinese). DOI: 10.3969/j.issn.1001-5485.2011.08.017
- Han, Q. (2014). Variation mechanism of the relation between Jingjiang River and Dongting Lake. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 31(6), 104-112 (in Chinese). DOI: 10.3969/j.issn.1001-5485.2014.06.021

- Hong, L., Dong, L., & Li, W. (2007). Impact of Three Gorges Reservoir on water level sediment and water quality of Dongting Lake. *China Water Resources*, 0(6), 13-14 (in Chinese). DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2007.06.008
- Hu, C., & Wang, Y. (2014). Sediment problems and relationship between river and lakes since the operation of three gorges project. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 31(5), 107-116 (in Chinese). DOI: 10.3969/j.issn.1001-5485.2014.05.022
- Hu, G. (2014). Study on the temporal-spatial evolvement of Runoff and sediment of the Dongting Lake and its impact on water security. Changsha, China: Hunan Normal University (in Chinese).
- Hu, G., & Mao, D. (2017). A study on the precipitation features and water regime of flood disaster in Dongting Lake Region during late spring and early summer of 2016. *Territory & Natural Resources Study*, (4), 20-26 (in Chinese). DOI: 10.16202/j.cnki.tnrs.2017.04.007
- Hu, G., Mao, D., Li, Z., Tan, Z., & Feng, C. (2013). Water and sediment process variation and impact analysis of Dongting Lake since the operation of the Three Gorges Project. *Research of Soil and Water Conservation*, 20(5), 170-175, 192 (in Chinese). Recuperate the https://caod.oriprobe.com/articles/40350591/Water_and_Sediment_Process_Variation_and_Impact_Analysis_of_Dongting_L.htm

- Hu, G., Mao, D., Li, Z., Tian, Z., & Feng, C. (2014a). Analysis on the runoff characteristics in and out dongting lake in recent 60 years. *Scientia Geographica Sinica*, 34(1), 89-96 (in Chinese). DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2014.01.002
- Hu, G., Mao, D., Li, Z., & Xu, Y. (2014b). Evolution processes and characteristics of annual runoff and sediment in Xiangjiang River from 1951 to 2011. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 34(1), 166-172 (in Chinese). DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2014.01.020
- Hu, G., Mao, D., Li, Z., Zeng, Y., & Feng, C. (2014c). Characteristics and driving factors of runoff and sediment changes fluxes into the Dongting Lake from three outlets in Jingjiang River during past 60 years. *Journal of Natural Resources*, 29(1), 129-142 (in Chinese). DOI: 10.11849/zrzyxb.2014.01.012
- Hu, G., & Zhang, L. (2018). The present situation in Dongting Lake Basin after the operation of Three Gorges Project and its influencing factor of drinking water safety. *Science & Technology Review*, 36(12), 86-93 (in Chinese). DOI: 10.3981/j.issn.1000-7857.2018.12.012
- Huang, Q., Sun, Z., & Jiang, J. (2011). Impacts of the operation of the Three Gorges Reservoir on the lake water level of Lake Dongting. *Journal of Lake Sciences*, 23(3), 424-428 (in Chinese). DOI: 10.18307/2011.0316
- Jiang, J., & Huang, Q. (1996). Study on impacts of the Three Gorge Project on water level of Dongting Lake. *Resources and Environment in the Yangtze Valley*, 5(4), 367-374 (in Chinese).

- Jiang, J., Huang, Q., & Sun, Z. (2009). Study on sediment deposition and shoal change in Dongting Lake. *Yangtze River*, 40(14), 74-75 (in Chinese). DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2009.14.027
- Karunanithi, N., Grenney, W. J., Whitley, D., & Bovee, K. (1994). Neural networks for river flow prediction. *Journal of computing in civil engineering*, 8(2), 201-220.
- Li, X., & Wang, C. (1997). Evolution trend of hydrologic and sediment regime in Jingjiang River and Dongting Lake. *Yangtze River*, 28(8), 7-9, 47 (in Chinese). DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.1997.08.003
- Lu, C. (2005). The current status and problems of river and lake relations. *Hunan Hydro & Power*, 6(6), 22-25 (in Chinese). DOI: 10.16052/j.cnki.hnslsd.2005.06.010
- Lu, J., & Luo, H. (1999). Preliminary analysis on variation of the relation between Yangtze River and Dongting Lake. *Yangtze River*, 30(4), 24-26 (in Chinese). DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.1999.04.010
- Lu, J., & Yao, S. (2018). Response mechanism of the river and lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River under the combined effect of reservoir groups. *Journal of Hydraulic Engineering*, 49(1), 36-46 (in Chinese). DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20170827
- Lu, S. (2009). Numerical simulation on waterlogging and flooding of the Four River and the Dongting Lake. Wuhan, China: Yangtze River Academy of Sciences (in Chinese).

- Mao, D., & Xia, J. (2005). Causing mechanism analysis of flood and waterlogged disaster in Dongting Lake Region. *Journal of Wuhan University (Natural Science Edition)*, 51(2), 199-203 (in Chinese). DOI: 10.3321/j.issn:1671-8836.2005.02.014
- Shi, X., Xia, W., & Yang, B. (1999). Sediment deposition and erosion in Dongting Lake (1956-1995). *Journal of Lake Science*, 11(3), 199-205 (in Chinese). DOI: 10.18307/1999.0302
- Shuai, H., Li, H., Li, S., & Li, R. (2018). Water environmental quality of Dongting Lake caused by impoundment of the Three Gorges Project. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 27(6), 1315-1323 (in Chinese). DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201806015
- Sun, S., Xie, P., Chen, K., Sang, Y., Dong, Q., Ning, M., & Zhou, H. (2018a). Impact of different refill operation rules of the Three Gorges Reservoir on the water level of the outlet of Dongting Lake. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 27(8), 1819-1826 (in Chinese). DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201808018
- Sun, S., Xie, P., Zhao, J., Sang, Y., Ning, M., & Zhou, H. (2018b). Variability in the annual flood peak discharge and water level in three outlets of Lake Dongting. *Journal of Lake Science*, 30(3), 812-824 (in Chinese). DOI: 10.18307/2018.0323
- Wan, R., Yang, G., Wang, X., Qin, N., & Dai, X. (2014). Progress of research on the relationship between the Yangtze River and its connected lakes in the middle reaches. *Journal of Lake Sciences*, 26(1), 1-8 (in Chinese). DOI: 10.18307/2014.0101

- Wang, M., Wang, J., Wang, Q., Yang, C., Zou, Z., & Qian, B. (2018). Characteristics of plankton community structure and eutrophication status in Dongting Lake in the season with normal water level. *Chinese Journal of Ecology*, 37(8), 2418-2429 (in Chinese). DOI: 10.13292/j.1000-4890.201808.004
- Wang, Q., Ou, F., Zhang, L., & Lu, S. (2015). Changes of water environment in Dongting Lake and its impact analysis after the Three Gorges Project operation. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 24(11), 1843-1849 (in Chinese). DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201511006
- Wu, H. (2016). Effects of ecological and environmental restoration and changes of relationship between lake and river on soil microorganisms in Dongting Lake wetland. Changsha, China: Hunan University (in Chinese).
- Xi, H., Wang, S., Zheng, B., Liu, Z., Yang, C., Feng, M., & Zhang, L. (2014). Ecological security evolvement in Poyang Lake influenced by basin human activity. *Research of Environmental Sciences*, 27(4), 398-405 (in Chinese). DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2014.04.08
- Zhang, G., Wang, C., & Tian, Q. (2016). Changes of water quality in Lake Dongting before and after Three Gorges Project operation. *Journal of Lake Sciences*, 28(4), 734-742 (in Chinese). DOI: 10.18307/2016.0406