

# 鄱阳湖流域水文连通性的影响因素和环境效应<sup>1</sup>

曾冰茹<sup>1,2</sup> 李云良<sup>1\*</sup> 谭志强<sup>1</sup>

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**【摘要】**: 在气候变化和人类活动的双重影响下, 流域下垫面情况发生了显著变化, 这些变化很大程度上改变了流域的水文连通性, 进而导致一些生态环境问题的发生。以鄱阳湖流域为研究区, 采用自动地球科学分析系统(SAGA), 引入考虑景观单元地形和土地覆盖等多因素的地形湿度指数和网络指数方法, 分析了鄱阳湖流域水文连通性的空间格局, 揭示了坡度变化、土地利用方式和土壤类型等对水文连通性的影响与贡献, 并以此探讨水文连通与水土流失、洪涝等方面的关联性。研究发现, 鄱阳湖流域的水文连通性呈北高南低的分布特征。总体上, 鄱阳湖流域可分为近湖区的强水文连通区、河流水系周边的中等水文连通区和上游山区的弱水文连通区。进一步空间分析得出, 坡度低缓的低洼区通常 NI 值较高, 而起伏变化大的地区 NI 值较低, 表明了地形因子对水文连通性具有重要影响。就鄱阳湖流域不同土地利用方式和土壤类型而言, 灌木林和森林的水文连通性最弱, 湿地、水体和耕地的较好, 黄壤和黄棕壤的水文连通性最差, 冲积土、水域和水稻土的较好。这是因为在地形的主导作用下, 流域下垫面的土壤入渗能力、蓄水和产流特点等共同影响了水文连通性的空间差异性。研究虽然侧重于从宏观角度上识别鄱阳湖流域的水文连通及其影响因素, 但最终可为流域土壤保护、土地利用规划和自然灾害应对等方面提供决策依据。

**【关键词】**: 水文连通性; 湿度指数; 网络指数; 土地利用; 土壤类型; 鄱阳湖流域

**【中图分类号】**: TV213. 4; X826 **【文献标识码】**: A **【文章编号】**: 1004- 8227(2022)12- 2718- 11

**【DOI】**: 10. 11870 / cjlyzyyhj202212015

水文连通性是在水文循环要素内或不同要素之间, 以水为媒介的物质、能量和生物体的传输过程<sup>[1]</sup>, 它是影响生态系统健康和水体生物生产力的质量和能量传输的重要因素。水文连通主要通过影响水文循环过程而改变湖泊湿地的水文水动力特征, 进而对区域水资源利用、水质净化和防洪等发挥重要作用<sup>[2,3]</sup>。此外, 水文连通性的变化可能会对侵蚀和沉积以及泥沙和泥沙相关物质的运输等过程产生重大影响<sup>[4]</sup>。实际上, 水文连通性受到众多因素制约, 如地形、土壤类型和分布、土地覆盖和利用, 并且它们都是影响水文连通性的关键因素<sup>[5,6]</sup>。鉴于水文连通性对景观格局和生境条件的重要性, 亟需从系统角度和宏观研究的思路, 首先要基于系统下垫面的深入分析, 提高对水文连通性的逐步探索和理解。

<sup>1</sup> **【收稿日期】**: 2021- 12- 10; **【修回日期】**: 2022- 03- 22

**【基金项目】**: 国家自然科学基金项目(42071036, 42171104); 江西省水文局青年科技创新基金项目(SWJJ- KT201904); 中科院青年创新促进会项目(Y9CJH01001)

**【作者简介】**: 曾冰茹(1999 ~ ), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为流域水文与环境. E- mail: 572449011@qq. com

\* 通讯作者 E- mail: yunliangli@niglas. ac. cn

目前,水文连通性的分析方法主要包括图论法、水力学法、数学模型、评估指数等,但针对大尺度流域系统的研究分析,学者们更倾向于采用水文连通性的评估指标。2009年 Lane 等<sup>[7]</sup>开发了网络指数(Network Index, NI)来预测水文连通性风险。NI 是水文连通性倾向的静态描述方法,它通过识别山坡上某点与水系相连的流动路径上地形湿度指数的最低值来量化该点的水文连通性。近年来,国内外许多学者采用 NI 方法做了大量连通性研究。Zhao 等<sup>[8]</sup>采用 NI 方法对延河流域的水文连通性进行了评估,Shore 等<sup>[9]</sup>利用 5 m 精度 DEM 研究了 NI 方法预测农业流域地表连通性的潜力。地形湿度指数(topographic wetness index, TWI)是由 Kirkby 等<sup>[10]</sup>在水文模型 TOPMODEL 的开发中而提出的,用来表示空间某点积累土壤水分的潜力,但 TWI 在一个平坦区域的环境中表现不佳。随后 Boehner 等<sup>[11]</sup>提出了 SAGA 湿度指数(SAGA wetness index, SWI),它使用了一个改良的集水区,改善了平坦区域的计算效果<sup>[12]</sup>。总的来说,这两个指标都具有识别景观中水流特征的功能,其中较高的值表示最有可能呈现饱和状态的区域,常见于洼地和汇聚景观中<sup>[13,14]</sup>。

近几十年来,在气候变化和人类活动的影响下,鄱阳湖流域下垫面状况已发生显著变化,这些变化影响了鄱阳湖各子流域的地表、地下水文和径流状况,进而影响了区域径流、泥沙的产生。由于鄱阳湖流域水文循环的变化,洪水事件加剧,给流域农业生产和人类生活造成了巨大损失<sup>[15]</sup>。就鄱阳湖流域的水文连通研究而言,前期已有许多学者围绕鄱阳湖及其周边湿地系统开展了相关研究,Liu 等<sup>[16]</sup>采用地统计学方法,并结合遥感手段对鄱阳湖洪泛平原的水文连通性进行了时空变化研究;Li 等<sup>[17]</sup>以鄱阳湖大型洪泛系统为对象,采用水动力模型和地统计学方法,定量研究了蓄水量变化与地表水文连通性的不同维度关系。尽管上述研究在水文连通性的概念和内涵、方法改进和评估应用等方面取得了不少研究成果,但主要侧重于下游湖泊湿地的生态环境保护方面。鄱阳湖流域,作为下游湖泊湿地水量、泥沙、营养盐等各种物质最关键的输入,虽然水文连通作为流域和湖泊湿地之间物质交换的重要连接纽带,但目前关于流域水文连通的相关工作几乎没有。因此,亟需从系统完整性和湖泊一流域相互作用的角度,开展基于流域下垫面多要素的水文和径流变化研究,以水文连通性的定量评估和重要性为核心,将对未来土地利用规划、水资源配置与保护、湖泊流域洪旱灾害调蓄与防御等发挥重要的科学支撑作用<sup>[18]</sup>。

基于上述背景,本文以鄱阳湖流域为研究区,侧重于系统思路和宏观尺度分析,主要研究目标为:(1)定量分析鄱阳湖流域及其子流域的湿度指数和水文连通性指数的空间分布与特征;(2)辨析流域不同土地利用方式、土壤类型和坡度变化对流域水文连通性的影响;(3)探究流域尺度水文连通变化与自然灾害之间的联系。

## 1 研究区概况

鄱阳湖流域(24° 29' N~29° 04' N, 113° 34' E~118° 28' E)位于长江中下游南岸(图 1),流域总面积约为 16.22 万 km<sup>2</sup>,覆盖江西省国土面积的 97.2%,约占长江流域面积的 10%,是中国具有典型代表性的内陆流域<sup>[19]</sup>。鄱阳湖流域属于亚热带季风湿润气候,降水量充沛,流域内生物多样性程度高,土地自然资源丰富,农业和渔业较为发达,是我国重要商品粮、油、棉花、水产品的重要生产基地<sup>[20]</sup>。鄱阳湖流域拥有中国最大的淡水湖,对周边的工农业发展及城市化进程影响很大,在长江中下游发挥了重要的生态功能和水文作用。鄱阳湖流域水系发达,流域面积大于 10 km<sup>2</sup> 的河流超过 3 000 条,大于 1 000 km<sup>2</sup> 的河流约 40 条,水系由赣江、抚河、信江、饶河和修水五大河流和环湖直接入湖河流及鄱阳湖共同组成,“五河”从南、东、西向北汇聚鄱阳湖后,经调蓄后由湖口注入长江。

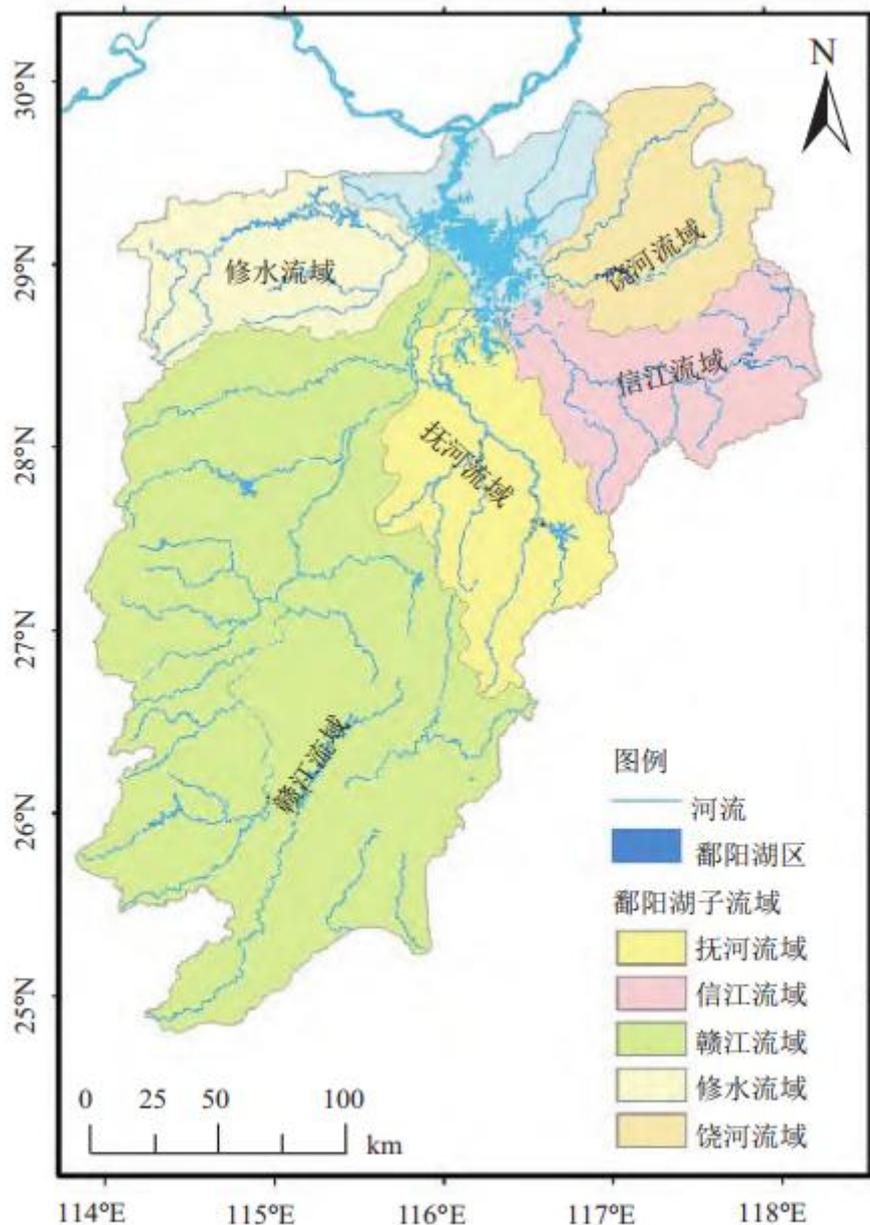


图 1 鄱阳湖流域地理位置及主要水系分布图

Fig. 1 Location and major rivers of Poyang Lake catchment

鄱阳湖流域北部为鄱阳湖平原，地势平坦，流域东南三面环山，地势较高(图 2a)。流域高程和坡度起伏变化很大，最大海拔 2 200 m 的上游山地的坡度大于  $30^\circ$ ，32 m 的下游洪泛平原区地面坡度小于  $2^\circ$  (图 2b)。本文所使用的鄱阳湖流域土壤类型数据来源于中国科学院南京土壤研究所，土壤化学属性数据来源于国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>)。流域主要以红壤、黄壤和水稻土为主，其中以红壤分布最广，约占流域总面积的 46%<sup>[21]</sup>，黄壤和黄棕壤主要分布在海拔 800 m 的地区，800 m 以下的丘陵地区主要分布紫色土和红壤，水稻土主要分布在河谷平原、丘间谷地和阶地<sup>[22]</sup>(图 2c)。鄱阳湖流域资源丰富，根据 2020 年 30 m 分辨率的 GlobeLand 30 全球地表覆盖数据，流域内土地利用方式以森林、耕地为主，其次为草地，灌木林和湿地的面积占比较小(图 2d)。数据资料得出，鄱阳湖流域的土壤孔隙度基本小于 0.6，田间持水量基本小于 0.5，饱和渗透系数最大可达 2.3 m/d，流域土壤的全磷含量在 15~114 g/kg 范围内，全氮含量介于 57~385 g/kg 之间，土壤有机质碳含量

空间值差异很大，最小值为 472 g/kg，最大值可达 9 089 g/kg。

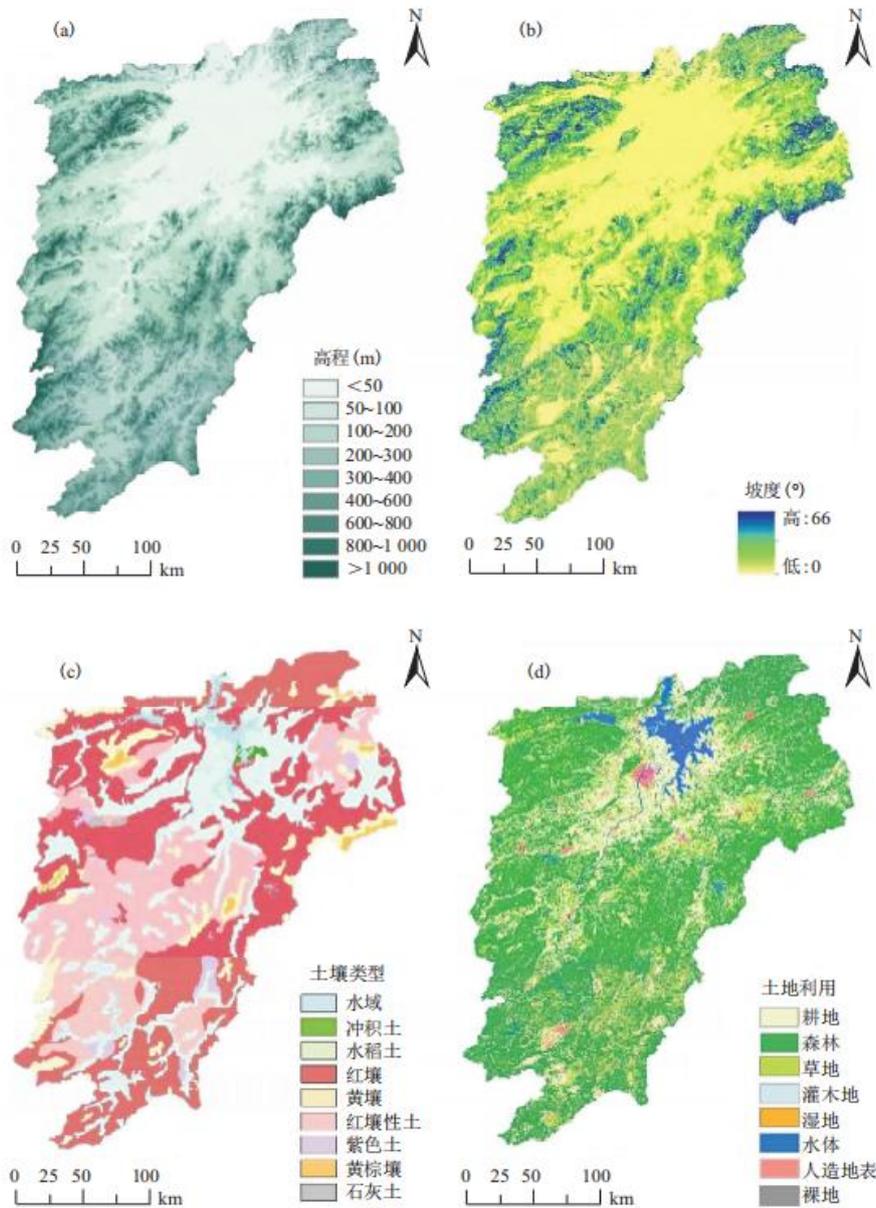


图2 鄱阳湖流域地形高程(a)、坡度分布(b)、土壤类型分布(c)和2020年土地利用类型分布(d)

Fig. 2 Terrain elevation (a), slope distribution (b), soil type distribution, (c) and land use type distributions in 2020 (d) of Poyang Lake catchment

## 2 研究方法

### 2.1 地形湿度指数(TWI)

文中基于流域数字高程模型 DEM 数据，采用 SAGA7.6.2 软件进行下垫面的地统计学分析。进一步根据 Topographic Wetness Index(One Step) 模块进行 TWI 的计算分析。TWI 是水文和环境分析中应用较为广泛的指标，该指标通常用来量化地形影响下土壤水分等水文变量的空间分布趋势，其定义如下<sup>[10]</sup>：

$$TWI = \ln\left(\frac{SCA}{\tan\phi}\right) \quad (1)$$

式中：SCA 为特定集水区面积(流经地表 i 点的单位等高线长度上的汇流面积)； $\phi$  为该点处的坡度( $^{\circ}$ )。根据上述定义，TWI 的高值往往出现在容易积水的区域以及具有低坡度特征的平坦地形区域，而 TWI 较低值通常出现在具有陡峭、分叉等特点的地域。

## 2.2 SAGA 湿度指数(SWI)

同样，基于 DEM 数据，进一步采用 SAGA 7.6.2 软件的 SAGA Wetness Index 功能<sup>[23]</sup>进行 SWI 的计算。SWI 的定义<sup>[11]</sup>：

$$SWI = \ln\left(\frac{SCA_m}{\tan\beta}\right) \quad (2)$$

式中：SCAm 是排水至该点的修正特定集水区面积； $\beta$  是坡度( $^{\circ}$ )。SWI 值越高，则表示该区域湿度越大，其中较高的值表示最可能出现饱和条件的区域。

## 2.3 网络指数(NI)

根据上述湿度指数的描述，网络指数(NI)为定量评价大尺度流域水文连通性状况的一个重要指数，用来量化一个位置到目标位置的水文连通性。应用 ArcGIS 10.7 中水文分析模块的填洼工具，对原始 DEM 数据进行地形填洼处理，获得无洼地的 DEM，然后利用 D8 算法计算出每个栅格的水流方向，得到 D8 流向栅格矩阵；基于 DEM 数据，使用 SAGA 软件进行湿度指数 TWI 和 SWI 的计算；最后采用 MATLAB 进行水文连通性指数 NI 的分析和计算。NI 的计算原理为：NI 确定沿流动路径到河流湿度指数的最低值，并将该值分配给沿流动路径上游遇到的每个新单元，直到遇到较低的湿度指数值，NI 的基本原理和概念描述可参考 Liu 等<sup>[24]</sup>沉积学连通研究。归一化 NI 值介于 0~1 之间，其值越高，代表流域内水文连通性越好，反之，代表流域水文连通性较差。本文 NI 的具体计算过程如图 3 所示。

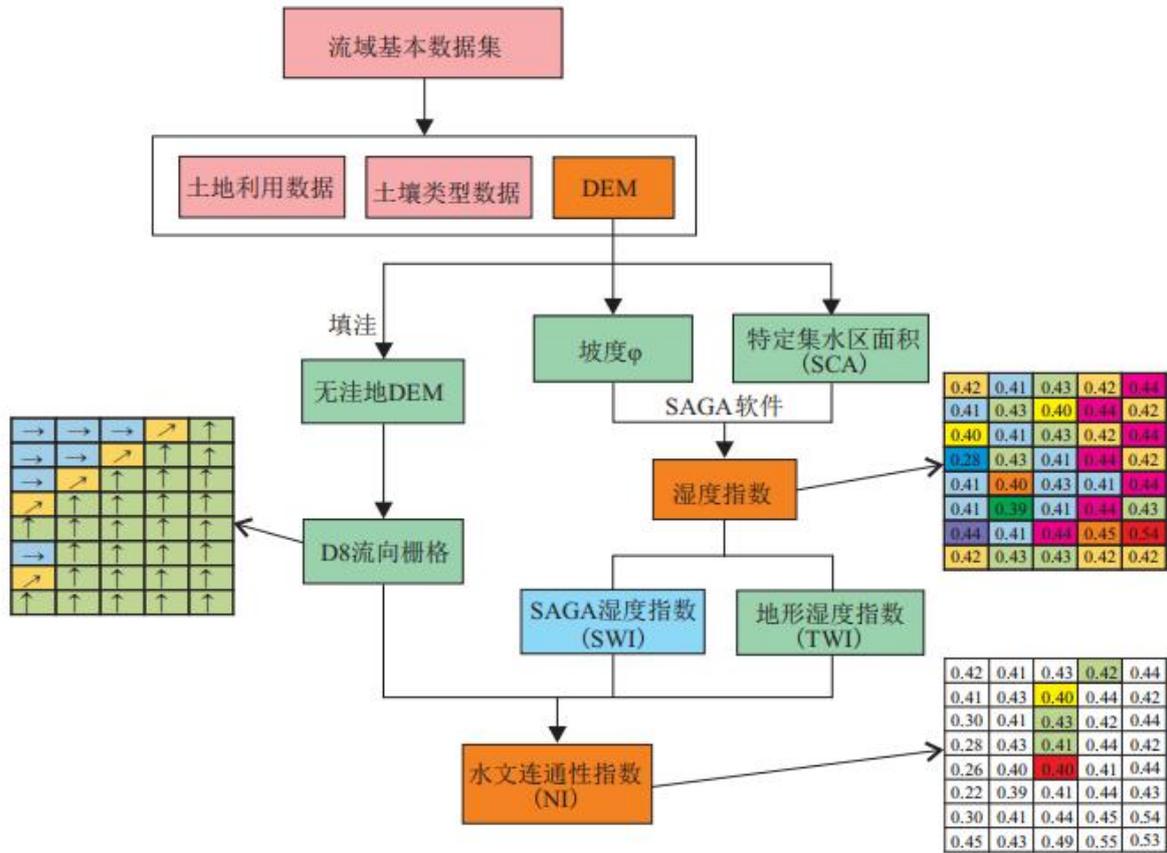


图3 流域水文连通计算流程图

Fig. 3 Flow chart of hydrological connectivity calculation of river basin

## 2.4 统计学方法

为比较分析地形湿度指数和水文连通性指数，文中采用 min-max 数据标准化处理方法，对指数数据进行线性变换，以将值映射到[0, 1]之间。归一化公式如下：

$$X^* = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (3)$$

式中：X\*为归一化后的数据结果；X为原始数据集；X<sub>max</sub>、X<sub>min</sub>分别为原始数据集的最大值和最小值。

此外，文中还采用了平均值、概率密度函数、曲线拟合等方法，主要用来进行空间不同区域的水文连通比较、分析连通指数的分布情况以及连通与其它下垫面要素的相互关系等，主要采用 MATLAB 软件来完成分析。

## 3 结果与讨论

### 3.1 湿度指数与水文连通指数

鄱阳湖流域归一化后的湿度指数 (TWI 和 SWI) 和基于湿度指数的水文连通性定量计算结果 (NI\_TWI 和 NI\_SWI) 的空间分布如图 4 所示, 湿度指数和水文连通性指数的空间分布格局极为相似, 尤其是流域河湖水系的密集分布区域。湿度指数 TWI 和 SWI 的高值主要集中在鄱阳湖周边的地形低洼区, 而低值主要分布在流域上游的广大山区, 呈现出以鄱阳湖湖区为中心向周边河流水系递减的总体分布特征 (图 4a 和图 4b)。水文连通性指数 NI\_TWI 和 NI\_SWI 的高值区主要分布在流域中下游以及各子流域与鄱阳湖的连接处, 即中下游平坦河谷地区的值 (约大于 0.5) 要明显高于上游山区 (约小于 0.2), 符合下垫面地形等因子影响下的水文连通分布特征 (图 4c 和图 4d)。概率分析得出, NI\_TWI 主要分布在 0.1~0.3 之间, NI\_SWI 主要分布在 0.2~0.6 之间 (图 4f)。统计结果进一步表明, 鄱阳湖流域 NI\_TWI 的平均值为 0.2, NI\_SWI 的平均值为 0.4, 但两者空间异质性相对较小。鄱阳湖流域中部地势平坦, SWI 是修正后的地形湿度指数, 它更好地解释了景观平坦区水的横向再分配, 与传统的 TWI 相比, 它提供了更真实、更高的潜在土壤水分积累<sup>[19]</sup>。因此, 由 SWI 计算出来的 NI 指数更适用于刻画鄱阳湖流域的水文连通性。

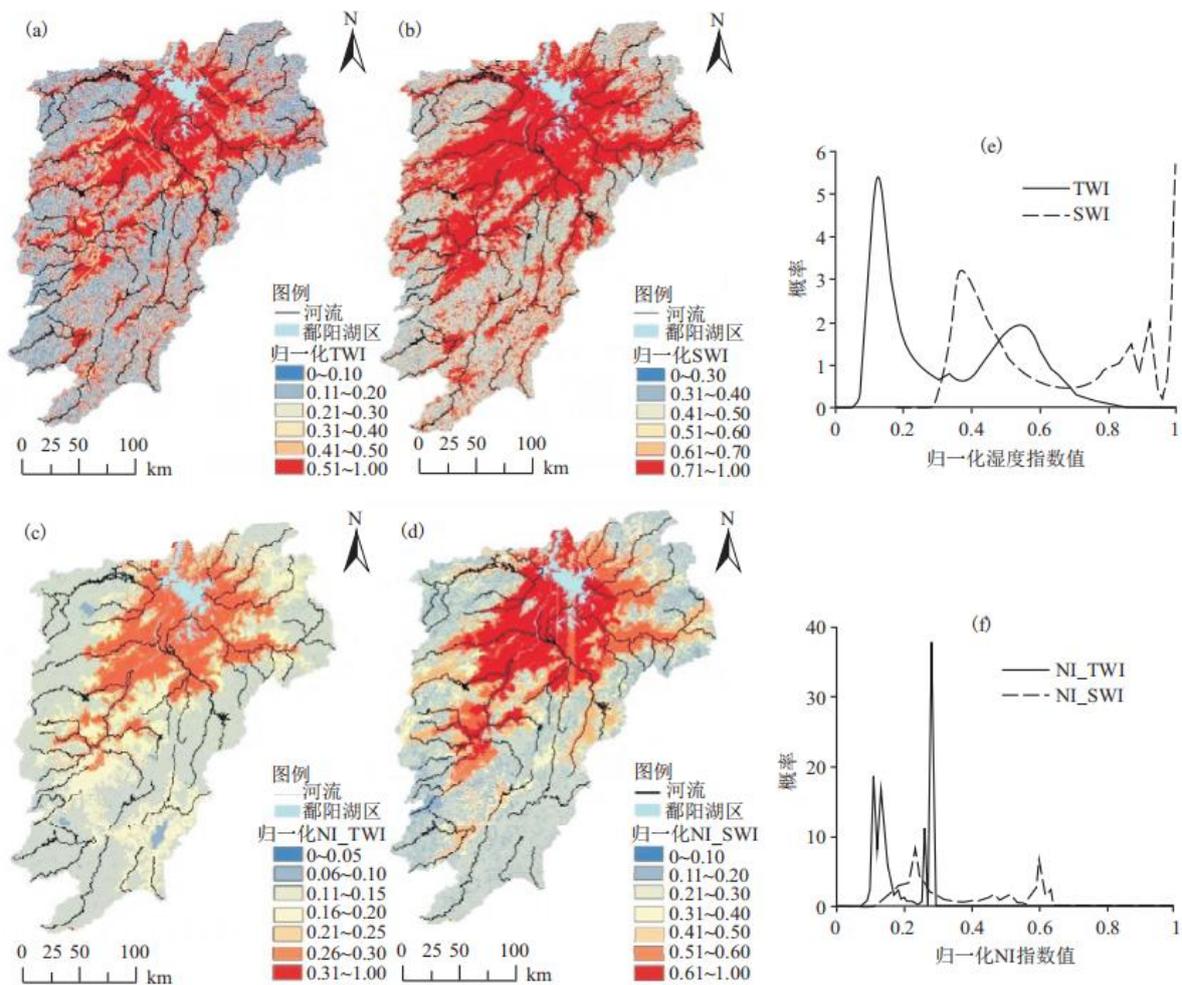


图 4 鄱阳湖流域归一化 (a) TWI、(b) SWI、(c) NI\_TWI 和 (d) NI\_SWI 的空间分布, 以及归一化 (e) 湿度指数和 (f) 水文连通性指数的概率密度分布

Fig. 4 Spatial distribution of normalized ( a ) TWI and ( b ) SWI, ( c ) NI\_TWI and ( d ) NI\_SWI, and associated probability density distributions of normalized ( e ) wetness indices and ( f ) hydrological connectivity indices

基于湿度指数和水文连通指数的空间格局及概率密度曲线, 可将鄱阳湖流域的连通性总体上分为 3 个等级, 即湖区周边的强水文连通区 (平原河网分布广泛)、河流水系周边的中等水文连通区 (相对低缓的坡地) 和上游山区的弱水文连通区 (地势起伏较大的山区高地)。由图 5a 可知, 在鄱阳湖流域高程 100 m 以下的广大区域, NI 值相对较大, 但随着高程的增加, NI 的均值和变

化幅度均呈逐渐减小的趋势。通常情况下，坡度与水文连通指数呈负相关关系，即随着坡度的增大，NI 值逐渐减小，且坡度介于  $0^{\circ} \sim 10^{\circ}$  的区域，NI 均值要明显高于其它坡度的 NI 均值(图 5b)。因此，具有低洼地形和低缓坡度特征的地区，容易形成较强的水文连通性。远离河道的坡地或山区，因地形变化起伏大，其水文连通性一般较小。总结得出，地形和坡度等下垫面因子影响了鄱阳湖流域水文连通的空间分布格局以及连通程度的强弱等基本特性。

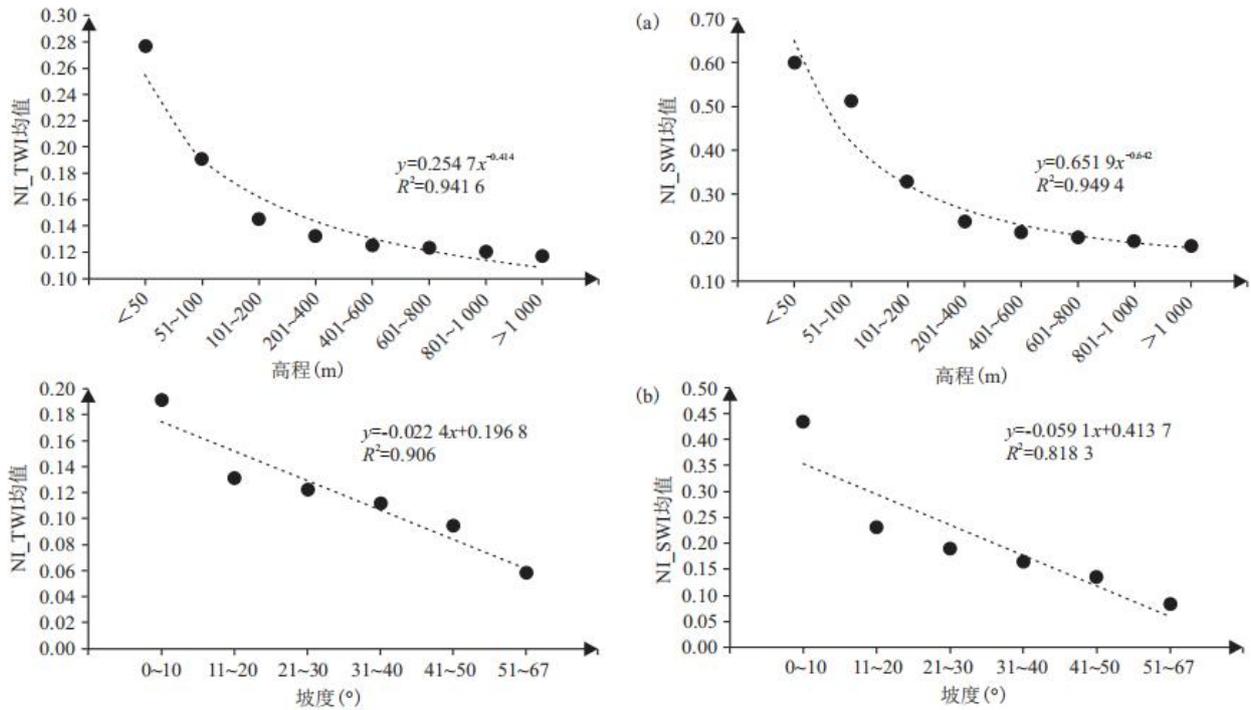


图 5 流域高程 DEM(a)和坡度(b)与 NI\_TWI 和 NI\_SWI 的关系

Fig. 5 Relationships between watershed elevation DEM (a) and slope (b) with NI\_TWI and NI\_SWI values

### 3.2 不同土壤和土地利用类型的水文连通性分布

不同土壤类型及土地利用方式往往呈现出不同的水文连通效应<sup>[25]</sup>。鄱阳湖流域不同土壤类型中水域和水稻土的 NI\_SWI 主要分布在 0.1~0.7 之间，且在 0.6 附近的数值很多，而黄壤和黄棕壤仅分布在 0.1~0.3 之间(图 6a)。由图 6b 可知，湿地、水体和人造地表的 NI\_SWI 峰值位于 0.6 附近，而植被覆盖率很高的森林以及草地在 0.2 达到峰值后则波动下降。统计结果进一步表明，鄱阳湖流域不同土壤类型的 NI\_SWI 均值以冲积土和水域最高，有黄壤和黄棕壤最低(图 6c)。通过不同土壤类型的孔隙度值可知，黄棕壤的孔隙度最大，黄壤次之，冲积土的孔隙度最小，石灰土、水域和水稻土的孔隙度都较低(图 6d)。综合分析可知，总体上孔隙度较大的土壤的 NI 均值较小，即水文连通性较低，反之，孔隙度较小的土壤水文连通性高。

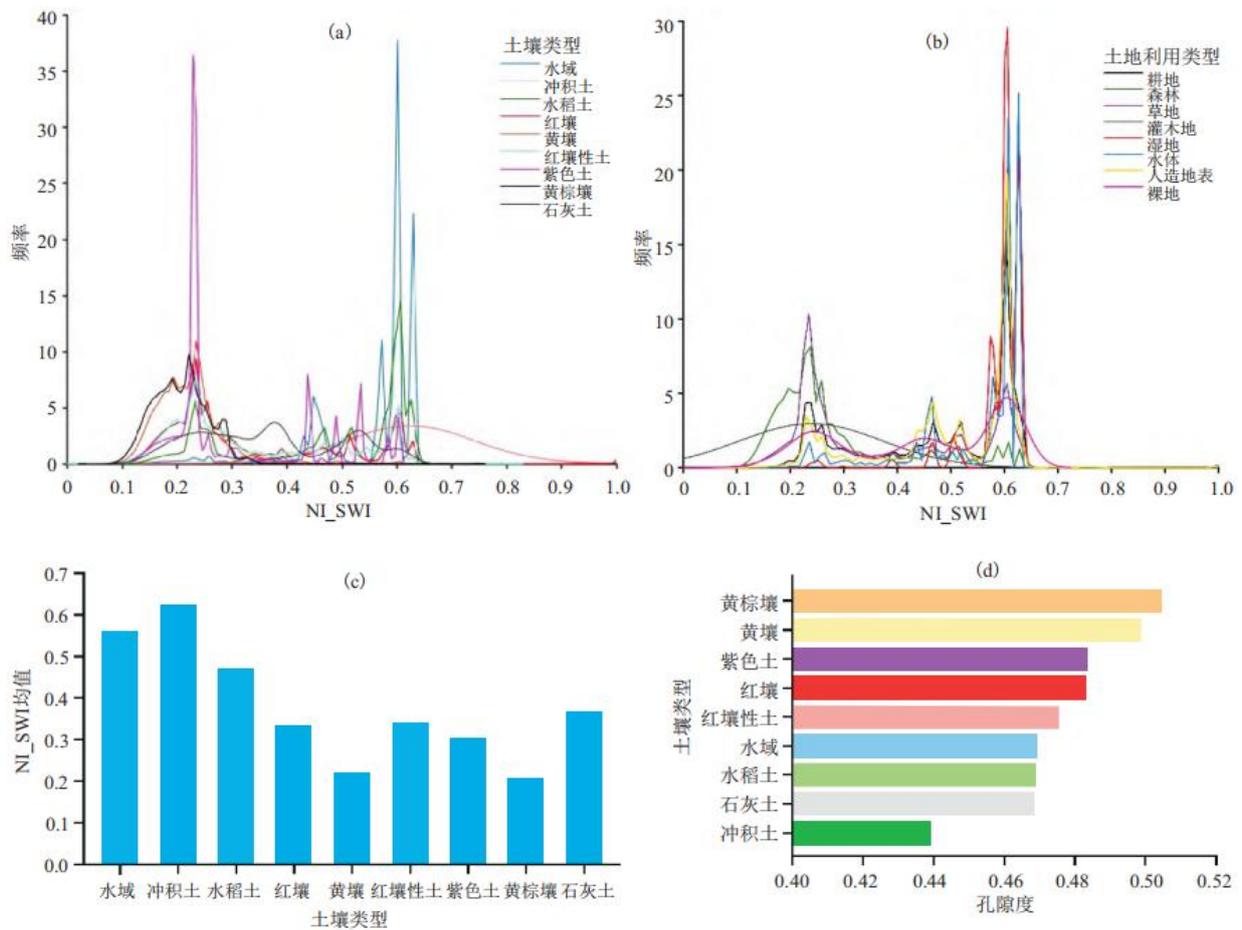


图 6 鄱阳湖流域不同土壤 (a) 和土地利用类型 (b) NI\_SWI 的概率密度分布, 以及不同土壤类型的 NI\_SWI 均值 (c) 和孔隙度值 (d)

Fig. 6 Associated probability density distributions of different soil types (a) and different land use types (b), and mean values of NI\_SWI (c) and porosity (d) of different soil types in Poyang Lake catchment

### 3.3 不同子流域水文连通性的差异

由图 7 对比结果可知, 抚河流域的水文连通指数 NI 值较大, 修河流域的 NI 值较小。平均意义上, 抚河流域的 NI 均值最高, 修河流域的 NI 均值最低。从表 1 可以看出, 就不同土地利用方式而言, 抚河流域耕地占比大于其它子流域, 修河流域耕地占比最小、森林占比最大; 不同土壤类型中, 修流域黄壤和红壤的占比最多, 远大于抚河流域。抚河流域地貌类型主要以低丘岗地为主, 海拔较低, 修河流域以山地为主, 海拔较高, 土地类型以林地为主<sup>[26]</sup>。不同子流域的水文连通之间存在差异, 加上土地利用方式和土壤类型的不同, 水文连通很有可能因下垫面差异影响河网泄洪排涝能力等诸多方面。

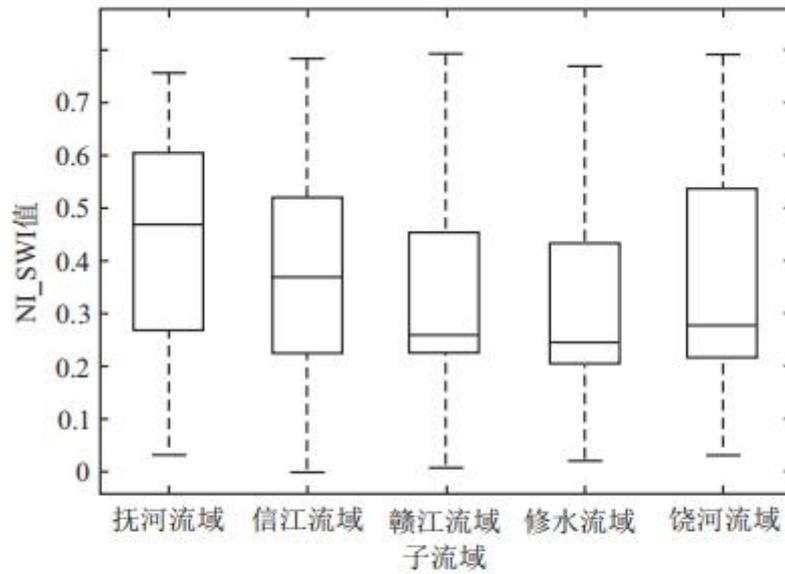


图 7 鄱阳湖流域各子流域归一化 NI\_SWI 箱形图

Fig. 7 NI\_SWI box plots for each sub-basin in Poyang Lake catchment

### 3.4 水文连通性的环境效应

#### 3.4.1 水文连通性对生态环境的影响

鄱阳湖流域作为一个相对完整的山水林田湖草生命共同体，尤其在长江流域绿色发展的新形势下，流域水文连通问题的相关研究将为区域生态环境保护提供重要科学参考。通过前文分析，鄱阳湖流域的水文连通总体上划分为 3 个主要区域，即近湖区的强水文连通区、河湖水系周边的中等连通区以及上游弱水文连通区(图 4)。从图 4 和图 8 中可以看出，NI 的高值区域，是土壤全氮和有机碳含量低值区。换句话说，就土壤化学元素分布而言，鄱阳湖湖区周边区域、中游河流水系周边区域、上游山区存在明显的元素含量空间差异性。由此可以推断，水文连通的空间变化可能会对土壤化学环境等造成一定影响，进而影响流域河道以及湖泊的水质水环境状况。因下垫面土壤和土地利用方式的差异，水文连通性很有可能带来空间上不同的生态环境效应问题。

表 1 鄱阳湖流域各子流域主要土地利用/土壤类型的占比

子流域	土地利用/土壤类型				
	耕地 (%)	森林 (%)	水稻土 (%)	红壤 (%)	黄壤 (%)
抚河流域	15.24	20.90	11.32	15.63	2.90

信江流域	12.10	23.08	12.50	20.13	3.95
饶河流域	11.17	37.55	9.86	25.76	4.71
赣江流域	12.03	29.47	8.77	19.03	2.40
修水流域	9.04	30.41	7.08	24.13	7.31

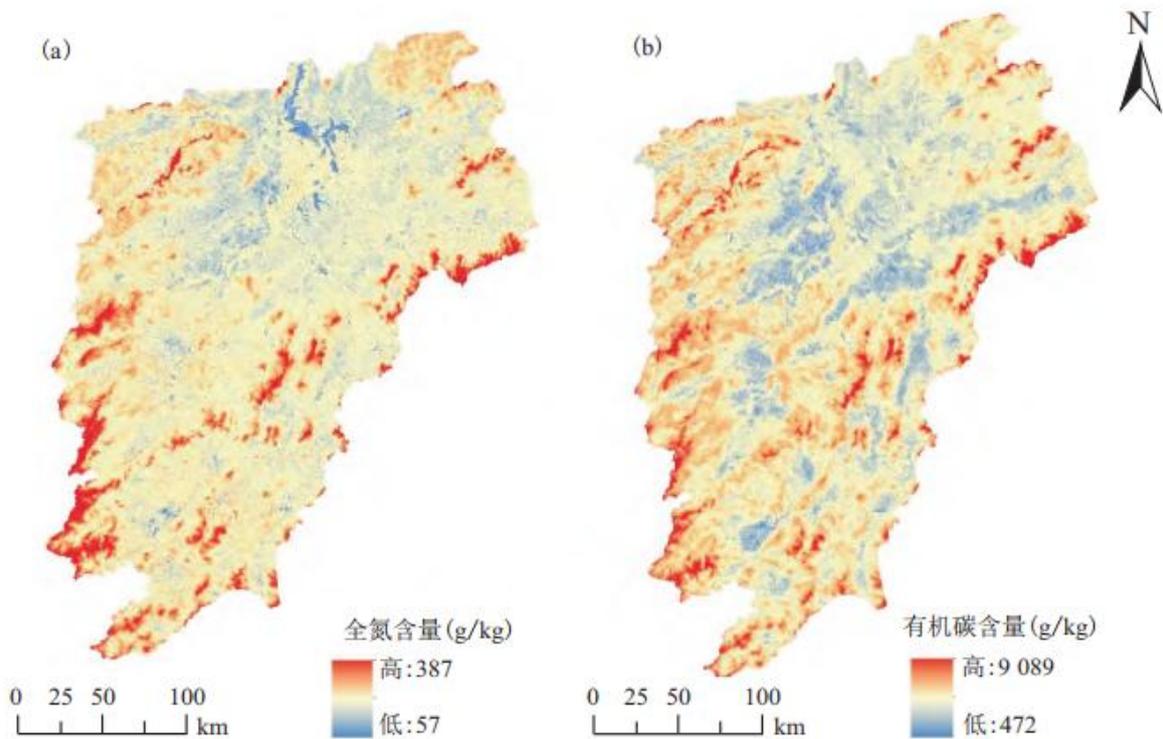


图 8 鄱阳湖流域土壤表层(0~5 cm)全氮(a)和有机碳含量(b)的空间分布  
 Fig. 8 Spatial distribution of total phosphorus (a) and organic carbon content (b) in surface soil (0~5 cm) of Poyang Lake catchment

### 3.4.2 水文连通性对洪涝的影响

水文连通对防洪的影响意义重大，众多历史性防洪经验表明，河道疏通或者连通比拦蓄更有利于洪水的治理<sup>[27]</sup>。鄱阳湖流域北部为鄱阳湖平原，地形低洼，排水迟缓，自古就是长江中下游洪涝灾害严重的地区。同时，由于人类活动加剧，特别是土地利用方式，土地利用通过植被与土壤和地表水的相互作用，造成水文连通改变，进而改变水文循环，影响流域的径流分布，导致洪水、干旱等自然灾害频繁发生，造成了大量的人员和财产损失。例如砍伐森林加重了水土流失，进而导致流域的河流、湖泊和水利枢纽泥沙淤积，严重影响了鄱阳湖的行洪、蓄洪能力，加剧了这一地区的洪涝灾害。因此，未来流域土地利用规划与发展应考虑水文连通的载体作用，及其自然和社会的二元属性特征。再则，未来流域自然灾害的管控与防治，应充分考虑下垫面的空间差异，因地制宜的提出空间联合防控策略等。

### 3.4.3 水文连通性对水土流失的影响

近几十年来,受到人类活动的影响,鄱阳湖流域的下垫面状况发生改变,间接导致径流发生变化,这些变化通过改变水文连通影响了流域的水文状况<sup>[28]</sup>。本研究发现鄱阳湖流域内灌木林、森林和草地的水文连通性较低,这种较低的连通能力表明其具有较好的水土保持能力,同时,植被根系对土壤的固持作用减少了地表径流对土壤颗粒的侵蚀与剥离,从而减少水土流失。就不同土壤类型而言,鄱阳湖流域主要以红壤和黄壤为主,红壤土质疏松,极易风化,水土流失严重。黄壤海拔主要分布在 800 m 以上,土壤孔隙度大,孔隙度较大的土壤植物根系难以扎根,水土保持能力较差,不易产生径流,因此水文连通性总体较低。综上所述,土地利用的合理规划是解决水土流失问题的关键因素,土壤类型也是影响土地利用规划效果的重要因素。

## 4 结论与展望

流域水文连通的空间格局与下游湖泊湿地的水文和生态环境条件密不可分。鄱阳湖流域生态结构相对完整、下垫面类型复杂且极具代表性。本文采用基于地形湿度指数的水文连通评估指数方法,结合地形因子、土壤类型和土地利用方式等因素,分析了流域水文连通性的空间格局、影响因素及其对生态环境的影响。

研究发现,鄱阳湖流域湿度指数和水文连通性指数的空间分布相似,TWI 和 SWI 的高值主要集中在鄱阳湖周边的地形低洼区,而低值主要分布在流域上游的广大山区;流域的水文连通性呈北高南低的趋势,总体上可分为近湖区的强水文连通区、河流水系周边的中等水文连通区和上游山区的弱水文连通区;流域 DEM 低值区的 NI 值远高于 DEM 高的区域;坡度与 NI 呈负相关关系,低坡度地区通常与高 NI 区域重合,地势较高的斜坡与低 NI 区域相吻合;根据水文连通性指数的定量评估结果,土地利用和土壤类型是影响水文连通的重要因素,一般情况下,鄱阳湖流域灌木林和森林的水文连通性最弱,湿地、水体和耕地的水文连通性较好,黄壤和黄棕壤的水文连通性最差,冲积土、水域和水稻土的水文连通性较好,总体上,孔隙度较大的土壤的 NI 均值较低,反之,NI 均值高。研究认为在流域地形高程的主控影响下,下垫面土壤入渗能力、蓄水和产流特点等共同影响了水文连通性的空间差异性,容易诱发不同类型的生态环境灾害。

本文从宏观视角探明了鄱阳湖流域的空间水文连通性,结合下垫面关键因子开展了自然灾害等探讨分析,但缺乏基于过程和机理的研究。未来应结合流域分布式水文模型,从空间上探究土壤和土地利用类型等水文连通变化的驱动机制,揭示水文连通与泥沙运输、水环境变化等的耦联关系,并用于指导相关工程实践(比如赣抚尾闾平原区)。

### 参考文献

- [1] QUINN P, BEVEN K, CHEVALLIER P, et al. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models[J]. *Hydrological Processes*, 1991, 5(1): 59-79.
- [2] 刘丹, 王烜, 李春晖, 等. 水文连通性对湖泊生态环境影响的研究进展[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(7): 1702-1715. LIU D, WANG X, LI C H, et al. Eco-environmental effects of hydrological connectivity on lakes: A review[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(7): 1702-1715.
- [3] AMOROS C, BORNETTE G. Connectivity and biocomplexity in waterbodies of riverine floodplains[J]. *Freshwater Biology*, 2002, 47(4): 761-776.
- [4] FREEMAN M C, PRINGLE C M, JACKSON C R. Hydrologic connectivity and the contribution of stream headwaters to ecological integrity at regional scales[J]. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 2007, 43(1): 5-14.

- 
- [5] 崔保山, 蔡燕子, 谢焯, 等. 湿地水文连通的生态效应研究进展及发展趋势[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2016, 52(6):738-746. CUI B S, CAI Y Z, XIE T, et al. Ecological effects of wetland hydrological connectivity: Problems and prospects[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2016, 52(6):738-746.
- [6] 刘时城. 延河流域不同尺度水文连通性研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2017. LIU S C. Research on hydrological connectivity at different scales in Yanhe River catchment[D]. Xi'an: Northwest A & F University, 2017.
- [7] LANE S N, BROOKES C J, KIRKBY M J, et al. A network-index-based version of TOPMODEL for use with high-resolution digital topographic data[J]. Hydrological Processes, 2004, 18(1):191-201.
- [8] ZHAO L, LIU Y, LUO Y. Assessing hydrological connectivity mitigated by reservoirs, vegetation cover, and climate in Yan river watershed on the loess plateau, China: The network approach[J]. Water, 2020, 12(6):1742.
- [9] SHORE M, MURPHY P N C, JORDAN P, et al. Evaluation of a surface hydrological connectivity index in agricultural catchments[J]. Environmental Modelling & Software, 2013, 47:7-15.
- [10] BEVEN K J, KIRKBY M J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology/Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant[J]. Hydrological Sciences Bulletin, 1979, 24(1):43-69.
- [11] BÖHNER J, SELIGE T. Spatial prediction of soil attributes using terrain analysis and climate regionalization, in SAGA — Analyses and Modelling Application[J]. Göttinger Geographische Abhandlungen, 2006, 115:13-28.
- [12] OLAYA V, CONRAD O. Chapter 12 geomorphometry in SAGA[J]. Developments in Soil Science, 2009, 33:293-308.
- [13] SUMFLETH K, DUTTMANN R. Prediction of soil property distribution in paddy soil landscapes using terrain data and satellite information as indicators[J]. Ecological Indicators, 2008, 8(5):485-501.
- [14] BEVEN K, WOOD E F. Catchment geomorphology and the dynamics of runoff contributing areas[J]. Journal of Hydrology, 1983, 65(1/2/3):139-158.
- [15] ZHANG Q, SUN P, CHEN X, et al. Hydrological extremes in the Poyang Lake Basin, China: Changing properties, causes and impacts[J]. Hydrological Processes, 2011, 25(20):3121-3130.
- [16] LIU X, ZHANG Q, LI Y, et al. Satellite image-based investigation of the seasonal variations in the hydrological connectivity of a large floodplain (Poyang Lake, China)[J]. Journal of Hydrology, 2020, 585:124810.
- [17] LI Y, ZHANG Q, YAO J, et al. Assessment of water storage response to surface hydrological connectivity in a large floodplain system (Poyang Lake, China) using hydrodynamic and geostatistical analysis[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2019, 33(11):2071-2088.
- [18] GUO H, HU Q, JIANG T. Annual and seasonal streamflow responses to climate and land-cover changes in the Poyang

---

Lake Basin, China[J]. Journal of Hydrology, 2008, 355(1/2/3/4):106-122.

[19] VENTURINI V, ISLAM S, RODRIGUEZ L. Estimation of evaporative fraction and evapotranspiration from MODIS products using a complementary based model[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(1):132-141.

[20] 曾瑜, 刘进宝, 厉莎, 等. 鄱阳湖流域气候变化和人类活动对入湖水沙的影响[J]. 人民长江, 2020, 51(1):28-35. ZENG Y, LIU J B, LI S, et al. Effects of climate variation and human activities on runoff and sediment into Poyang Lake[J]. Yangtze River, 2020, 51(1):28-35.

[21] 熊梦雅. 人类活动对鄱阳湖流域侵蚀产沙与输沙的影响[D]. 南昌: 江西师范大学, 2016. XIONG M Y. Impacts from human activities on soil erosion, sediment yield and transport in Poyang Lake basin[D]. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2016.

[22] 樊哲文, 黄灵光, 钱海燕, 等. 鄱阳湖流域土地利用变化的土壤侵蚀效应[J]. 资源科学, 2009, 31(10):1787-1792. FAN Z W, HUANG L G, QIAN H Y, et al. Soil erosion effects driven by land use changes over the Poyang Lake basin[J]. Resources Science, 2009, 31(10):1787-1792.

[23] CONRAD O, BECHTEL B, BOCK M, et al. System for automated geoscientific analyses (SAGA) v. 2.1.4[J]. Geoscientific Model Development, 2015, 8(7):1991-2007.

[24] LIU Y, FU B. Assessing sedimentological connectivity using WATEM/SEDEM model in a hilly and gully watershed of the Loess Plateau, China[J]. Ecological Indicators, 2016, 66:259-268.

[25] LIU Y, FU B, LÜ Y, et al. Hydrological responses and soil erosion potential of abandoned cropland in the Loess Plateau, China[J]. Geomorphology, 2012, 138(1):404-414.

[26] 田鹏. 气候与土地利用变化对径流的影响研究——以鄱阳湖流域为例[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2012. TIAN P. Impacts of climate and land use change on streamflow a case study in the Poyang Lake basin[D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2012.

[27] 郭云腾. 四湖流域水文连通度及其对洪水期水文过程的影响[D]. 武汉: 华中师范大学, 2014. GUO Y T. Hydrological connectivity and the hydrological processes influence on flood season in Si hu area[D]. Wuhan: Central China Normal University, 2014.

[28] 刘剑宇, 张强, 邓晓宇, 等. 气候变化和人类活动对鄱阳湖流域径流过程影响的定量分析[J]. 湖泊科学, 2016, 28(2):432-443. LIU J Y, ZHANG Q, DENG X Y, et al. Quantitative analysis the influences of climate change and human activities on hydrological processes in Poyang Basin[J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(2):432-443.