

秦淮河流域水源涵养 与水质净化服务空间分布特征

童 建¹, 陈 霞¹, 罗俐雅², 刘志杰³, 周 惟³, 徐 慧³

(1. 江苏省水土保持生态环境监测总站, 江苏 南京 210012; 2. 江苏省水文水资源勘测局, 江苏 南京 210029;
3. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要:为揭示秦淮河流域不同生态系统的水源涵养和水质净化功能的空间差异,采用水量平衡法、污染物滞留量法计算该流域2020年的水源涵养和水质净化能力,并借助ArcGIS平台进行空间等级划分,从而得到秦淮河流域水源涵养和水质净化的空间分布特征。结果表明:秦淮河流域水源涵养服务大多处于中低水平和中水平,水质净化服务也主要处于中低水平和中水平。

关键词:水源涵养; 水质净化; 空间分布; 秦淮河流域

中图分类号:TV85

文献标识码:B

文章编号:1007-7839(2022)11-0031-0006

Spatial distribution characteristics of water resource conservation and water purification services in the Qinhuai River Basin

TONG Jian¹, CHEN Xia¹, LUO Liya², LIU Zhijie³, ZHOU Wei³, XU Hui³

(1. Soil and Water Conservation Ecological Environment Monitoring Station of Jiangsu Province, Nanjing 210012, China; 2. Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Nanjing 210029, China;
3. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to reveal the spatial differences in water conservation and water purification functions of different ecosystems in the Qinhuai River Basin, the water resource conservation and water purification capacity of the basin in 2020 was calculated by the water balance method and the pollutant retention method, and the spatial grading was divided with the help of ArcGIS platform, so as to obtain the spatial distribution characteristics of water resource conservation and water purification in the Qinhuai River Basin. The results show that most of the water resource conservation services in the Qinhuai River Basin are at the middle-low level and the middle level, and water purification services are also mainly at the middle-low level and the middle level.

Key words: water resource conservation; water purification; spatial distribution; Qinhuai River Basin

生态系统服务是指生态系统通过其组成及相互作用,直接或间接为人类发展提供必需的自然环境产品并发挥其效用。水源涵养和水质净化分别对水资源和水环境起着至关重要的作用,直接影响

着水量和水质的变化,是生态系统服务的重要组成部分。水源涵养和水质净化服务的空间分布在制定水源保护规划、生态空间识别,水生态功能区划、河湖生态空间管控等方面具有重要意义。

收稿日期: 2022-06-27

基金项目: 江苏省水利科技项目(2021043)

作者简介: 童建(1975—),男,高级工程师,主要从事水生态环境保护研究工作。E-mail: 51241919@qq.com

通信作者: 徐慧(1969—),女,副教授,博士,主要从事水生态保护研究。E-mail: njxh@hhu.edu.cn

近年来,气候变化和人类活动频繁,特别是社会经济的快速发展引起了土地利用覆被变化,硬化地面、不透水面积在不断扩大,生态空间不断被挤压,相应的生态功能受到干扰和破坏,而秦淮河流域正全面对接“长江大保护”“长三角一体化”和“苏南现代建设示范区”等重大发展战略,不断扩大的城镇范围需要匹配更优质的供水保障以及更完善的水生态保护体系,这些都离不开合理的水源涵养和水质净化服务支撑。同时,为保障流域水生态系统和“山水林田湖草”综合系统的健康,实现水资源和岸线资源的保护与优化配置,有必要对水源涵养和水质净化服务空间进行识别与划定。本文从水资源、水环境2个角度出发,对秦淮河流域的水源涵养、水质净化服务功能进行空间识别并分析其分布特征。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

秦淮河流域位于长江下游,江苏省西南部,地形为四面环山,中间低平的山间盆地,总面积2 684 km²,流域内丘陵山区的面积占总面积的74%,其余为低洼圩区和河湖水面。流域属北亚热带季风气候区,多年平均降水量1 027.5 mm,降水量年际变化大。以流域内句容站为例,年最大降水量达2 056 mm(1991年),是年平均降水量的2倍;年最小降水量为

489.7 mm(1978年),仅为年平均降水量的46.2%;多年平均蒸发量在1 000 mm左右,6—9月蒸发量占总蒸发量的一半左右,年际变化较大。秦淮河流域跨南京、镇江2市,流域内人口稠密,政治、经济地位显著,素有“小流域,大保障”之称。

1.2 数据来源

本研究所涉及的主要数据包括土地利用、气象、地形等,具体见表1。

土地利用使用中国科学院资源环境科学与数据中心 GLC_FCS30-1985_2020 系列 2020 年的数据,分辨率为 30 m,秦淮河流域涉及 14 个地表覆盖类型,将其重分类为建设用地、湿地、耕地、草地及林地,共计 5 种用地类型。由表 2、图 1 可知秦淮河流域各类土地面积占比由大到小依次为耕地、建设用地、林地、湿地、草地。其中,耕地面积占比最大,达 68.4%;建设用地主要分布在秦淮河流域的西北部,部分位于南部、东北部,涉及南京市、溧水区、句容市的城区;林地主要分布在流域的边缘部;湿地以湖泊湿地、水库湿地为主;草地零星分布在林地周边。

2 研究方法

2.1 水源涵养

水源涵养是指生态系统通过其特有的结构与水相互作用,对降水进行截留、渗透、蓄积,并通过

表 1 数据来源与说明

数据类型	数据说明	数据来源
土地利用	2020 年秦淮河流域 30 m 土地利用类型数据	中国科学院资源环境科学与数据中心
DEM	2020 年秦淮河流域 30 m DEM 数字高程	中国科学院空天信息创新研究院
日降水量	1991—2021 年东山、艾园、赤山新闻三个水文站点日降水量数据	江苏省水土保持生态环境监测总站
蒸散发	2020 年中国 1 km 逐月潜在蒸散发数据集	国家青藏高原科学数据中心
土壤	江苏省 250 m 土壤类型栅格数据	中国土壤数据库
流域边界	秦淮河流域边界矢量	江苏省秦淮河水利工程管理处

表 2 土地利用重分类

重分类类型	斑块数量/个	面积占比/%	原分类类型
耕地	2 466 591	68.4	旱地、草本覆盖层、水浇地
林地	212 729	5.9	常绿阔叶林、封闭常绿阔叶林、落叶阔叶林、封闭落叶阔叶林、针叶林、封闭针叶林
草地	39 595	1.1	草原
湿地	140 129	3.9	湿地、水体
建设用地	746 266	20.7	不透水面

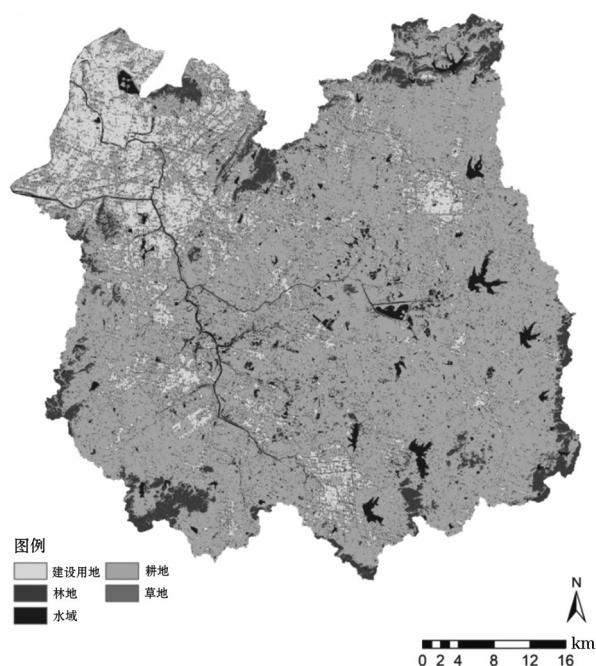


图1 2020年秦淮河流域土地利用分布

蒸发实现对水流、水循环的调控^[1]。水源涵养是一个非常重要的生态服务功能,其与降水量、蒸散发量、地表径流量和植被覆盖类型等因素密切相关。本文采用水量平衡法^[2]计算秦淮河流域的水源涵养量,公式如下:

$$T_Q = \sum_{i=1}^n (P_i - Q_i - ET_i) \times A_i \quad (1)$$

式中: T_Q 为水源涵养量, m^3 ; i 为研究区第 i 个栅格单元, n 为研究区栅格单元总数; P_i 为降水量, mm ; Q_i 为地表径流量, mm ; ET_i 为蒸散发, mm ; A_i 为第 i 个栅格单元的面积。

选取2020年东山、艾园、赤山新闸3个水文站点的逐日降水量数据,计算得出年降水量,再运用克里金插值方法以及ArcGIS技术,直接生成降水量因子栅格图。

地表径流可由SCS-CN模型降水量数据和土壤数据计算得到^[3],计算公式如下:

$$Q_{i,j} = \begin{cases} \frac{(P_j - 0.2S)^2}{P_j + 0.8S} & P_j \geq 0.2S \\ 0 & P_j < 0.2S \end{cases} \quad (2)$$

式中: $Q_{i,j}$ 为在降雨事件 j 中,第 i 个栅格上产生的径流深度, mm ; P_j 为降雨事件 j 中的日降水量, mm ; S 为土壤的潜在最大蓄水载荷。

S 通常由含有CN值参数的方程计算:

$$S = 25400 / CN - 254 \quad (3)$$

式中:CN值为径流曲线数,是地表产流能力的综合

反映。

根据SCS-CN模型计算地表径流量,得到研究区径流深度因子栅格图。通过ArcGIS对土地利用数据进行二级分类,得到研究区生态系统分布栅格图,利用蒸散发数据提取研究区蒸散发因子栅格图。最后,将各栅格图重采样为30 m分辨率,计算研究区水源涵养量。

2.2 水质净化

水质净化能力分为陆域和水体水质净化能力。陆域水质净化能力指在降水径流过程中减少了水体中的污染物含量,提供面源污染物削减服务功能,即在降水径流过程中通过截留、下渗等未能成为径流的降水带走的污染物含量;水体水质净化能力指在降水径流过程中形成径流的降水携带的污染物含量^[4]。利用SCS-CN模型计算不同生态系统在降水径流过程中的径流分布情况,借助流域不同生态系统的污染物质量浓度,得到面源污染物削减量,从而体现不同土地利用类型在水质净化中的贡献,削减量越大,水质净化服务功能越强。本文采用污染物滞留量法^[5]计算秦淮河流域的水质净化能力,公式如下:

$$\Delta Q_i = \sum_j P_{i,j} - Q_{i,j} \quad (4)$$

$$NS_i = \sum_j \frac{\Delta Q_{i,j} \times A_i \times \rho_{E_{M,i}}}{10^3} \quad (5)$$

$$WNS_i = \left(\sum \frac{Q_i \times A_i \times \rho_{E_{M,i}}}{10^3} \right) / A_{\text{水体总面积}} \times A_i \quad (6)$$

式中: NS_i 为第 i 个地块的陆域年均面源污染物减少量, g/yr ; WNS_i 为第 i 个地块的水体年均面源污染物负荷, g/yr ; $\Delta Q_{i,j}$ 为在降雨事件 j 中,第 i 个栅格上削减的径流深度, mm ; $Q_{i,j}$ 为在降雨事件 j 中,第 i 个栅格上产生的径流深度, mm ; P_j 为降雨事件 j 中的日降水量, mm ; $\rho_{E_{M,i}}$ 为面源污染物在第 i 个栅格上的质量浓度, mg/L ; A_i 为第 i 个栅格的面积, m^2 。

考虑秦淮河流域环境状况,选取COD、TP、 NH_3-N 作为判断流域水质净化能力的污染物指标,参考庞琰瑾等^[6]研究的流域不同土地利用类型的污染物质量浓度(表3),得到研究区面源污染减少量和径流污染含量。不同污染物的减少量不能直接比较,需要将不同污染物减少量进行归一化处理后再进行栅格叠加,从而得到陆域水质净化栅格。将流域范围内的径流污染物按照公式(6)进行栅格计算,将不同污染物减少量归一化处理后再进行栅格叠加,从而得到水域水质净化栅格;叠加陆域水质净化栅格和水域水质净化栅格。得到水质综合净化

表1 不同土地利用类型的径流污染物质量浓度

类型	$\rho(\text{COD})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TP})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
耕地	40	3.400	0.600
草地	50	0.867	0.433
建设用地	98.81	0.977	2.607
林地	160	1.300	0.650

栅格,并利自然间断点分级法将其分为5级,分别为低水平、中低水平、中水平、中高水平、高水平;水域水质净化能力明显高于陆域,将水域分类为高水平区域。

3 结果与分析

3.1 水源涵养服务空间分布

经计算,得到研究区水源涵养服务的空间分布情况,将其按照自然断点分级法分为5个水平,分别为低水平($0\sim 98.94\text{ m}^3$)、中低水平($98.94\sim 284.44\text{ m}^3$)、中水平($284.44\sim 383.37\text{ m}^3$)、中高水平($383.37\sim 489.73\text{ m}^3$)、高水平($489.73\sim 630.71\text{ m}^3$)。各等级水平分布情况如图2所示,面积占比见图3。可见,大部分地区水源涵养服务处于中低水平和中水平,水源涵养服务水平的高低与多种因素有着密切关系。高水平水源涵养功能区主要位于秦淮河流域的西南湿地和边缘山区,占流域面积的4.99%,流域西南部降水丰富,且该地区有赵村、卧龙、中山等水库湿地和凉帽山、乌王山、云台山等山区林地,对降水具有较好的滞留调蓄作用,产生的地表径流量最少,蒸发量较低,因此水源涵养服务水平最高;中高水平水源涵养功能区主要位于秦淮河流域的四周边缘,占流域面积的11.94%,该流域东部边缘有蒋门山等,南部边缘有凉帽山、东庐山等,西部边缘有马山等,北部边缘有九华山、大龙山等,该区域以林地为主,植被覆盖面积广,对雨水的滞留效果较好,产生的地表径流量低,蒸散发量不大,但降水量较大,因此总体来说该区域的水源涵养服务水平位列第二;中水平水源涵养功能区主要位于秦淮河流域的西部以及东北地区,占流域面积的35.88%,该区域主要以耕地为主,对雨水的滞留效果较林地有所下降,降水量较高,但是蒸散发量也很高,因此该区域的水源涵养服务水平处于中等;中低水平水源涵养功能区主要位于秦淮河流域的东部地区,占流域面积的30.37%,该区域以耕地为主,对降水的滞留能力较差,蒸发很大,降水量小,因此水源涵养服务

水平较差;低水平水源涵养功能区主要位于秦淮河流域的西北地区,东部、南部的部分地区,占流域面积的16.83%,该区域主要集中在建设用地,流域西北部是南京市主城区,东部有句容市区,流域南部有溧水区的主要街道,地面多是硬化化地面,植被覆盖度低,对降水的滞留能力差,地表径流量最大,降水量不高,蒸发较强,并且这些区域人口密度大,对水资源的消耗大,因此水源涵养服务水平最差。总之,草地、湿地主要集中在中高水平和中水平地区;林地多处于高、中高水平地区;耕地大多处于中、中低水平地区;建设用地则主要集中在低水平地区。

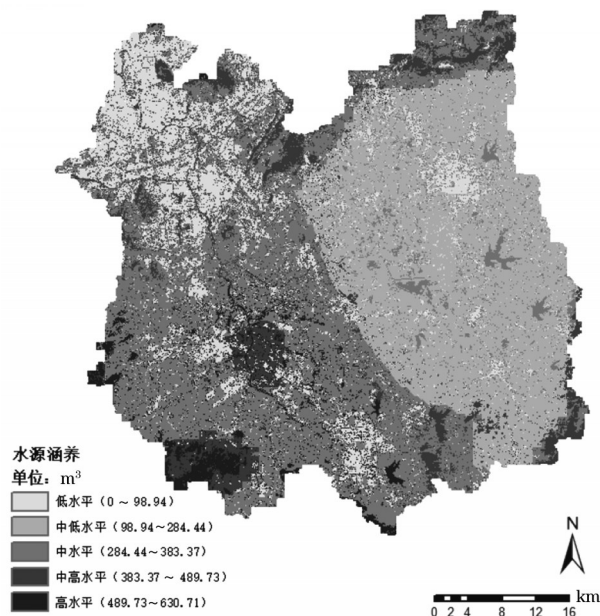


图2 秦淮河流域水源涵养服务空间分布

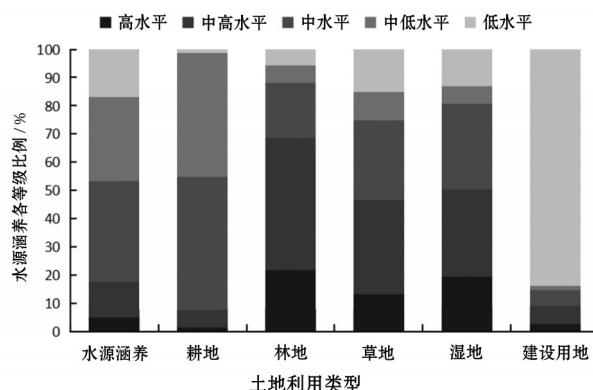


图3 秦淮河流域和不同土地利用类型水源涵养5个等级的比例

3.2 水质净化服务空间分布

通过公式(4)~(6)计算,得到COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP

削减量空间分布的结果,如图4所示,利用ArcGIS进行等权叠加分析,得到研究区水质净化服务的空间分布情况,将其按照自然断点法分为5个水平,分别为低水平(无量纲:0~0.64)、中低水平(无量纲:

0.64~1.02)、中水平(无量纲:1.02~1.22)、中高水平(无量纲:1.22~1.54)、高水平(无量纲:1.54~2.79)。各水平分布情况如图5所示,面积占比见图6。水质净化高水平区域占流域面积的5.90%,主要分布在

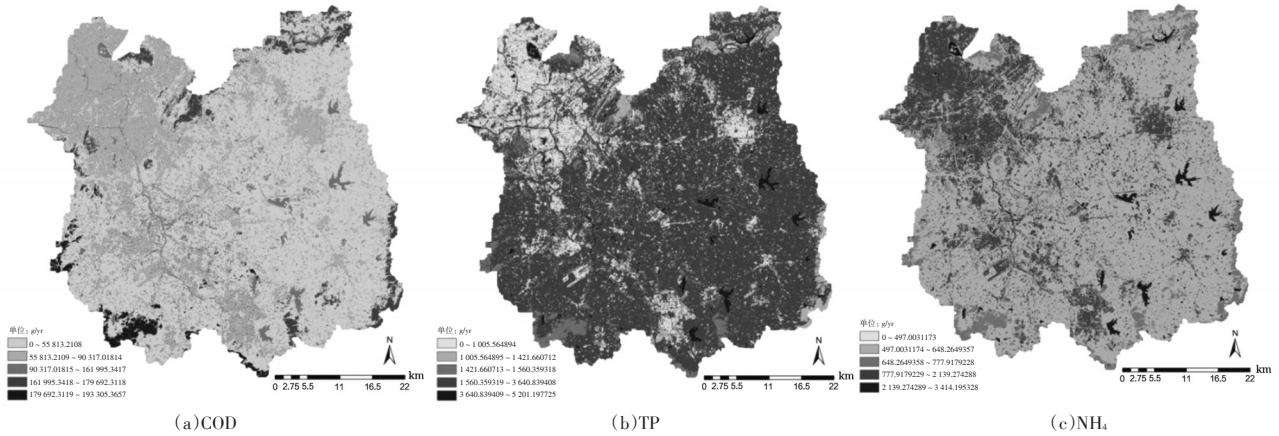


图4 秦淮河流域COD、TP、NH₃-N削减量分布

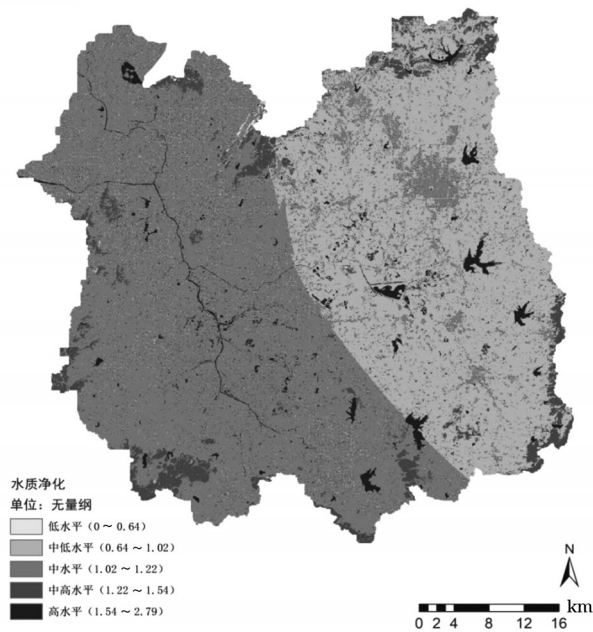


图5 秦淮河流域水质净化服务空间分布

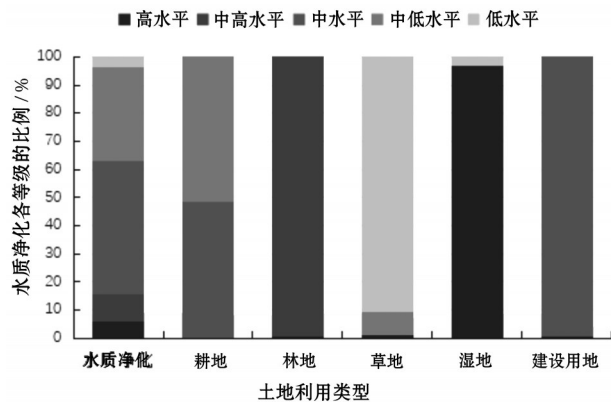


图6 秦淮河流域及不同土地利用类型水质净化5个等级的比例

流域河流和湖泊部分,受到水体自净能力影响较大,该区域COD、NH₃-N、TP削减量都很高,水质净化能力最强;中高水平区域面积占比达到9.58%,以林地为主,集中分布在流域边缘部分,森林生态系统对NH₃-N、TP的削减量仅次于水体,存在个别森林生态系统的COD的削减量略高于水体;中水平区域面积最大,占比达到47.55%,以耕地和建设用地为主,集中分布在流域西部和东部建城区,该区域建设用地的COD削减量较高,耕地的TP削减量较高,相应污染物的水质净化能力更强;中低水平区域占流域面积的33.25%,大多位于流域东部的耕地部分,该区域COD、NH₃-N的削减量较低,水质净化能力较差;低水平区域大多是草地,占流域面积最小,约为3.72%,在流域内零散分布,草地的COD、NH₃-N、TP削减量均较低,水质净化能力最弱。总之,湿地、林地大多处于中高、高水平;建设用地、耕地大多处于中水平;草地大多处于低水平。

3.3 管控建议

针对水源涵养区域建议如下:(1)高水平和中高水平区域,应严格禁止城市开发建设,主要包括重要湖泊、水库等湿地生态斑块和山区林地,需保留自然湿地状态,充分发挥生态保育功能,提高水源涵养服务功能;(2)中水平区域,应限制城市开发建设,注重区域的生物多样性保护,多植树,多种草,加强土壤固持能力;退耕还林、还湿地,建设湿地公园,维持较少干扰的人类活动;(3)低水平和中低水平区域,允许城市合理开发建设,重点保护饮

用水源地,构建河流生态蓝线,建立绿色缓冲带,建设绿色公园。

针对水质净化区域建议如下:(1)高水平和中高水平区域,以保护为主要管控方向,限制或禁止陡坡地开垦和种植,封禁管护,加大力度保护森林和湿地生态系统,加强水源地保护、饮水安全保护,生产建设项目禁止建设;(2)中水平区域,应配套建设垃圾和污水处理设施,配套建设水利工程和农田林网,完善农田排水系统,控制和减少人为活动产生的污染物,削减入河污染物排放,改善人居生态环境;(3)低水平和中低水平区域,应该大力开展植树造林绿化活动,可种植经济林,在增强水质净化能力的同时增加经济效益。

4 结 语

本文基于水量平衡法和污染物滞留量法,对秦淮河流域水源涵养和净化水质功能进行空间识别,提出分析不同空间等级的可操作方法,将水源涵养、水质净化的服务能力在空间上划分为低水平、

中低水平、中水平、中高水平、高水平5个等级水平,以探究秦淮河流域水源涵养和水质净化服务空间分布特征,并对不同水平空间的生态系统服务提出了相应的管控建议。

参考文献:

- [1] 张慧. 基于生态服务功能的南京市生态格局研究[D]. 南京:南京师范大学,2016.
- [2] 曹叶琳,宋进喜,李明月,等. 陕西省生态系统水源涵养功能评估分析[J]. 水土保持学报,2020,34(4):217-223.
- [3] 张改英. 基于SCS-CN方法的水文过程计算模型研究[D]. 南京:南京师范大学,2014.
- [4] 付超,苏晶,赵海萍,等. 基于GIS的漳河上游城市非点源污染负荷估算[J]. 水资源保护,2020,36(3):60-66.
- [5] 匡舒雅,李天宏,赵志杰. 基于L-THIA模型的四川省岷溪河流域非点源污染负荷分析[J]. 环境科学研究,2018,31(4):688-696.
- [6] 庞琰瑾,袁增伟. 平原河网区降雨径流污染负荷测算—以太湖流域望虞河西岸为例[J]. 湖泊科学,2021,33(2):439-448.
- [7] 进展与展望[J]. 湖泊科学,2020,32(5):1254-1277.
- [2] 毛新伟,作芸颖,徐枫. 太湖底泥主要营养物质污染特征分析[J]. 水资源保护,2020,36(4):100-104.
- [3] 董敏,王鹏,马德堂. 生态清淤技术在白洋淀水环境治理中的应用[J]. 水运工程,2021(10):64-67,73.
- [4] 陆子川. 湖泊底泥挖掘可能导致水体氮磷平衡破坏的研究[J]. 中国环境监测,2001(2):40-42.
- [5] 钟继承,刘国锋,范成新,等. 湖泊底泥疏浚环境效应:Ⅲ. 对沉积物反硝化作用的影响[J]. 湖泊科学,2009,21(4):465-473.
- [6] 钟继承,范成新. 底泥疏浚效果及环境效应研究进展[J]. 湖泊科学,2007(1):1-10.
- [7] 毛志刚,谷孝鸿,陆小明,等. 太湖东部不同类型湖区底泥疏浚的生态效应[J]. 湖泊科学,2014,26(3):385-392.
- [8] 濮培民,王国祥,胡春华,等. 底泥疏浚能控制湖泊富营养化吗?[J]. 湖泊科学,2000,12(3):269-279.
- [9] 朱敏,王国祥,王建,等. 南京玄武湖清淤前后底泥主要污染指标的变化[J]. 南京师范大学学报(工程技术版),2004(2):66-69.
- [10] 姜莘红,周易勇,纪磊,等. 月湖底泥疏浚后底栖动物群落的恢复及其与环境的关系[J]. 生态环境学报,2012,21(6):1088-1095.
- [11] 杨桐,尹成杰,过龙根,等. 环保疏浚对洱海西沙坪湾底栖动物群落结构的影响[J]. 水生态学杂志,2022,43(2):77-85.
- [12] 李宝,丁士明,范成新,等. 滇池福保湾底泥内源氮磷营养盐释放通量估算[J]. 环境科学,2008(1):114-120.
- [13] 李运奔,匡帅,王臻宇,等. 东巢湖沉积物—水界面氮、磷、氧迁移特征及意义[J]. 湖泊科学,2020,32(3):688-700.
- [14] 钟继承,刘国锋,范成新,等. 湖泊底泥疏浚环境效应:Ⅱ. 内源氮释放控制作用[J]. 湖泊科学,2009,21(3):335-344.
- [15] 钟继承,刘国锋,范成新,等. 湖泊底泥疏浚环境效应:Ⅰ. 内源磷释放控制作用[J]. 湖泊科学,2009,21(1):84-93.
- [16] 陈超,钟继承,范成新,等. 湖泊疏浚方式对内源释放影响的模拟研究[J]. 环境科学,2013,34(10):3872-3878.
- [17] 温茂增,颜秉龙,王哲,等. 摇蚊幼虫扰动对间隙水氨氮、硝氮的影响[J]. 环境科学与技术,2020,43(8):1-6.
- [18] 杨艳青,刘凌,陈沐松,等. 摇蚊幼虫生物扰动对富营养化湖泊内源磷释放的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2016,44(6):485-490.
- [19] 刘国锋,张志勇,刘海琴,等. 底泥疏浚对竺山湖底栖生物群落结构变化及水质影响[J]. 环境科学,2010,31(11):2645-51.
- [20] 何俊,谷孝鸿,刘国锋. 东太湖水生植物及其与环境的相互作用[J]. 湖泊科学,2008(6):790-795.
- [21] 吴沛沛,刘劲松,胡晓东,等. 漏湖北部底泥疏浚的生态效应研究[J]. 水生态学杂志,2015,36(2):32-38.

(上接第30页)