

DOI: 10.5846/stxb202004230973

张建, 雷刚, 漆良华. 南水北调中线水源区丹江口市域景观格局变化及氮磷净化能力. 生态学报, 2021, 41(6): 2261-2271.

Zhang J, Lei G, Qi L H. Change of landscape pattern and nitrogen and phosphorus removal in Danjiangkou City, the Middle Route of the South-to-North Water Diversion Project. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(6): 2261-2271.

南水北调中线水源区丹江口市域景观格局变化及氮磷净化能力

张 建¹, 雷 刚², 漆良华^{1,2,*}

1 国际竹藤中心 国家林业和草原局/北京市共建竹藤科学与技术重点实验室, 北京 100102

2 国际竹藤中心安徽太平试验中心, 太平 245700

摘要: 丹江口库区是南水北调中线工程重要水源地, 通过探究库区景观格局变化与氮磷净化能力, 对未来景观规划和生态系统功能提升提供科学依据。在县域尺度上以丹江口市为研究区, 运用景观格局指数和 InVEST 模型研究 2003—2018 年库区景观格局和氮磷净化能力, 并利用 Pearson 相关分析和 RDA 分析法探讨二者之间的关系, 分析引起氮磷净化能力变化的因素。结果表明: 在斑块类型上, 水域面积和林地面积不断增加, 耕地和园地面积逐渐减少, 建设用地面积整体上呈增长趋势; 在景观水平上, 景观形状指数不断减少, 蔓延度指数和聚集度指数整体呈增长趋势, 形状复杂程度降低, 景观聚集程度提升, 散布与并列指数增加了 5.58, 香农多样性指数变幅较小, 各斑块类型趋于规则, 呈均衡趋势分布。2003 年、2008 年、2013 年和 2018 年氮磷净化能力呈持续增强趋势, 其中 TN 输出总量分别为 899.224、801.481、776.979、672.149 t, TP 输出总量分别为 77.308、69.921、68.163、60.802 t, 15 年间 TN、TP 的净化能力分别增强了 25.3% 和 21.4%; 对氮磷净化能力重要性等级划分表明, 极重要、高度重要区主要分布于库区、河流两岸和林地区域。利用 Pearson 相关分析和 RDA 分析法表明, 在斑块类型上林地与氮磷的输出呈显著负相关, 耕地、园地和建设用地与氮磷输出量呈正相关; 在景观水平上氮磷输出量与景观形状指数呈显著正相关, 和散布与并列指数表现出显著负相关, 与蔓延度指数、聚集度指数呈负相关。因此, 可在库区氮磷输出量较高的地区种植喜氮喜磷植物, 通过调节景观格局结构, 合理规划土地利用, 增加林地面积, 建设河岸植被缓冲带充分滞缓径流等一系列措施, 充分保障库区水源水质安全。

关键词: 氮磷净化能力; InVEST 模型; 景观格局; 丹江口库区

Change of landscape pattern and nitrogen and phosphorus removal in Danjiangkou City, the Middle Route of the South-to-North Water Diversion Project

ZHANG Jian¹, LEI Gang², QI Lianghua^{1,2,*}

1 Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration/Beijing for Bamboo & Rattan Science and Technology, International Centre for Bamboo and Rattan, Beijing 100102, China

2 Anhui Taiping Test Center of International Centre for Bamboo and Rattan, Taiping 245700, China

Abstract: The Danjiangkou Reservoir is an important water source for the South-to-North Water Diversion Middle Route Project. Exploring changes in the landscape pattern and nitrogen and phosphorus removal capabilities of the reservoir area provides a scientific basis for future landscape planning and ecosystem function enhancement. Taking Danjiangkou City as the research area, using the landscape pattern index and the InVEST model to study the landscape pattern and nitrogen and

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2017YFC0505603)

收稿日期: 2020-04-23; 网络出版日期: 2021-01-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qlh@icbr.ac.cn

phosphorus removal capacity of the reservoir area from 2003 to 2018. Pearson correlation analysis and RDA analysis were used to analyze the relationship between them and analyze the factors causing the change of nitrogen and phosphorus removal capacity. The results show that in terms of patch types, the water area and woodland continue to increase, the area of cropland and orchard land gradually decreases, and the area of urbanized land shows an overall growth trend. At the landscape level, the landscape shape index continues to decrease, the contagion index and the aggregation index indicate an overall increasing trend, the shape complexity decreases, the landscape agglomeration degree increases, the interspersions and juxtaposition index increases by 5.58, and the Shannon diversity index has a smaller change. Each patch type tends to be regular, showing a balanced trend distribution. In 2003, 2008, 2013 and 2018, the nitrogen and phosphorus removal capacity continued to increase. The total output of TN was 899.224 t, 801.481 t, 776.979 t, and 672.149 t, respectively, and the total output of TP was 77.308 t and 69.921 t, 68.163 t, 60.802 t, respectively. The water removal capacity of TN and TP has increased by 25.3% and 21.4% respectively in 15 years. The classification of the importance of nitrogen and phosphorus removal capacity shows that extremely important and highly important areas are mainly distributed in reservoir areas, river banks and woodland areas. Pearson correlation analysis and RDA analysis show that the woodland area and the output of nitrogen and phosphorus are significantly negatively correlated on the patch type, while the output of cropland land, orchard land, and urbanized land is positively correlated with the output of nitrogen and phosphorus. At the landscape level, there is a significantly positive correlation between the output of nitrogen and phosphorus and the landscape shape index, and a significantly negative correlation between the interspersions and juxtaposition index, and the negative correlation with the contagion index and the aggregation index. Therefore, plants that removing nitrogen and phosphorus can be planted in areas with high nitrogen and phosphorus output in the reservoir area. A series of measures, such as adjusting landscape structure, rationally planning land use, increasing forestland area, constructing riparian vegetation buffer zone to fully slow down runoff, can fully guarantee the water quality safety of reservoir area.

Key Words: nitrogen and phosphorus removal; InVEST model; landscape pattern; Danjiangkou reservoir area

氮磷净化能力是水质净化功能的重要体现,对制定水源保护规划,落实陆域-水域综合保护,防治水体污染,保障区域用水安全具有重要意义^[1-2]。丹江口库区作为南水北调中线工程重要水源地,其水质状况对工程具有举足轻重的作用,不仅关系到库区及沿线地区人民生活、生产用水安全,更影响着周边地区社会和经济的发展。

目前常用的水质评价方法有单因子法、综合指数法、灰色评价法、水质指数法、多变量分析法等^[3],这些方法多用来评价水质状况,无法针对水质净化功能进行评估。随着 3S 等技术的发展,生态系统服务模型的建立与使用成为研究热点,SWAT 模型^[4]、HSPF 模型^[5]和 InVEST 模型^[6]等被开发利用。InVEST 模型以其简单、快速和强大的空间表达能力成为应用最广泛的工具,该模型营养盐输送率(NDR)模块专门用于模拟氮、磷出口的水质净化功能研究,并已在世界许多地区得到应用。Goldstein 等^[7]研究了粮食作物、牧草情景及生物燃料等七种情境下对夏威夷岛屿水质净化功能空间分异情况;王大尚等^[8]利用 InVEST 模型对密云水库上游流域氮磷水质净化服务在内的诸多生态系统服务功能及居民福祉进行了定量评估和空间特征刻画;吴瑞等^[9]、韩会庆等^[10]利用模型对官厅水库、贵州省珠江流域氮、磷水质净化功能开展研究。

水质净化能力不仅受地形、地貌、降水等自然因素的影响,人类活动引起的景观格局变化以及城镇化集聚、农业生产等均会影响污染物的迁移和转化,从而改变进入河流污染物的数量,对流域水质产生重要影响。研究表明景观格局变化是影响水质净化的关键因子^[11-12],不同景观要素如景观类型、景观面积及景观特征均对水质净化能力产生显著影响^[13-14]。赵鹏等^[15]运用多变量分析方法,分析流域、河岸带尺度的景观组成和空间格局指数与水质的关系,结果表明流域尺度下景观指数对水质影响较大;李昆等^[16]利用 3S 技术和景观格局指数以 7 种空间尺度的湖滨带缓冲区为对象,研究景观格局对洪湖水水质变化的空间尺度效应;Oliverira^[17]

等选择河岸缓冲区和专属贡献区,分析了景观格局与五个选定水质指数之间的联系;Rajaei^[18]研究了塔简河流域景观格局与硝酸盐等污染物的相关性,结果表明流域硝态氮与斑块密度、景观形态指数等景观格局指数呈正相关。王瑛^[19]研究了景观格局与水环境变化的响应,发现通过人为措施合理改变景观结构对控制面源污染具有显著作用。因此,探讨景观格局与水质净化能力的关系,对于揭示库区景观格局变化,合理规划景观减少面源污染的传递具有重要意义。

丹江口库区是南水北调中线工程重要水源地,水环境状况不仅威胁当地生态环境和用水安全,更直接关系到工程受水区的水量和水质。《丹江口汇水区土壤养分状况及农作物施肥量调查研究报告(2015)》显示,库区污染源中农业面源污染占比高达 70%,库区坡耕地主要经济作物柑橘为面源污染主要来源,化肥和农药的不合理使用带来较高的氮磷输出,高强度集中降水带来的水土流失成为面源污染迁移的重要载体,大量养分进入水体造成水质退化,由此产生的一系列生态问题为学者所关注。Wang 等^[20]研究了丹江口库区景观格局和土地利用变化对水生态时空变化的关系,但由于数据量较少,而未能准确反映生态系统服务的变化;张煦等^[21]基于水质理化指标对丹江口库区水质开展监测,得出农业污染是影响水质安全的重要因素,丁霞等^[22]对库区马尾松林水源涵养价值进行了研究,缺乏水质时空动态变化。目前,该区景观格局变化和氮磷净化能力及二者关系的研究罕有报道。基于此,在县域尺度上以丹江口市为研究区域,利用景观格局指数和 InVEST 模型分析 2003—2018 年景观格局变化和水质中氮磷净化能力,并利用 Pearson 相关分析和 RDA 冗余分析研究二者的关系,探讨引起氮磷净化能力变化因素,以期对丹江口库区水源水质保护提供科学依据。

1 研究区概况

丹江口市位于湖北省西北部、鄂豫两省交界,是南水北调中线工程水源地,国家级重点生态功能区,素有“中国水都”之称,水源区位于秦岭巴山之间,汉江中上游,市跨 32°14′10″—32°58′10″N, 110°47′53″—110°34′47″E 之间;属于北亚热带季风区的温暖半湿润气候,四季分明,降水分布不均,年平均气温 15.9℃,年降水量约 800 mm,年蒸发量为 1979.1 mm;河流以汉江为主,自西向东横跨全境;土壤以黄棕壤和黄壤为主,成土母质由石灰岩、片麻岩等发育而成,质地疏松,地貌类型多以低山丘陵为主;库区森林类型由人工林和次生林组成,马尾松(*Pinus massoniana*)、栓皮栎(*Quercus variabilis*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)等广泛分布;经济以农林牧渔业发展为主,并广泛种植柑橘(*Citrus reticulata* Blanco)。

2 研究方法

2.1 数据来源及处理

InVEST 模型水质净化模块所需数据包括研究区土地利用/覆被图、降水量、年潜在蒸散量、土壤深度、植物可利用含水量、DEM 数据与流域及子流域、生物物理系数表、氮磷输出负荷数据以及流域累积阈值等数据。土地利用/覆被图通过遥感影像图解译得到,选择 2003 年 Landsat 7 ETM+、2008 年 Landsat-5 TM、2013 年和 2018 年 Landsat 8 OLI_TIRS 影像,分辨率为 30 m;在 ENVI 软件中通过几何校正、融合镶嵌、裁剪处理,将研究区分为林地、耕地、园地、建设用地、水域和未利用地 6 类,见图 1。

降水数据通过中国气象数据网获得,对研究区域及周边气象站点进行克里金插值分析。年潜在蒸散量利用中国地面气象观测报告,收集研究区周边 4 气象站数据,运用 Hargreaves 方程^[23]计算年潜在蒸发量。土壤深度根据森林资源二类调查结果,采用克里金插值得到模型所需栅格图。植被可利用水含量可评估土壤为植被生长所储蓄的总水量,也可确定田间持水量和萎蔫点的差值^[24],计算公式选取周文佐等^[25]所提出的 AWC 模型进行估算,将计算的结果进行克里金插值得到模型所需栅格图。

$$AWC = [54.509 - 0.132 \times SAN - 0.003 \times SAN^2 - 0.055 \times SIL - 0.006 \times SIL^2 - 0.738 \times CLA + 0.007 \times CLA^2 - 2.688 \times C + 0.501 \times C^2] \times 100\% \quad (1)$$

式中, SAN 为土壤的沙粒含量(%); SIL 为土壤的粉粒含量(%); CLA 为土壤的黏粒含量(%); C 为土壤的有

机质含量(%)。

DEM 数据从地理空间数据云网站获取,经镶嵌、裁剪、填注处理,使用水文分析工具和矢量数据生成流域和子流域,每一级流域赋予唯一数值。生物物理系数表和氮磷输出负荷数据,参考丹江口库区的调查和文献^[22, 26-27]及 InVEST 模型用户指南获得,相关参数见表 1。

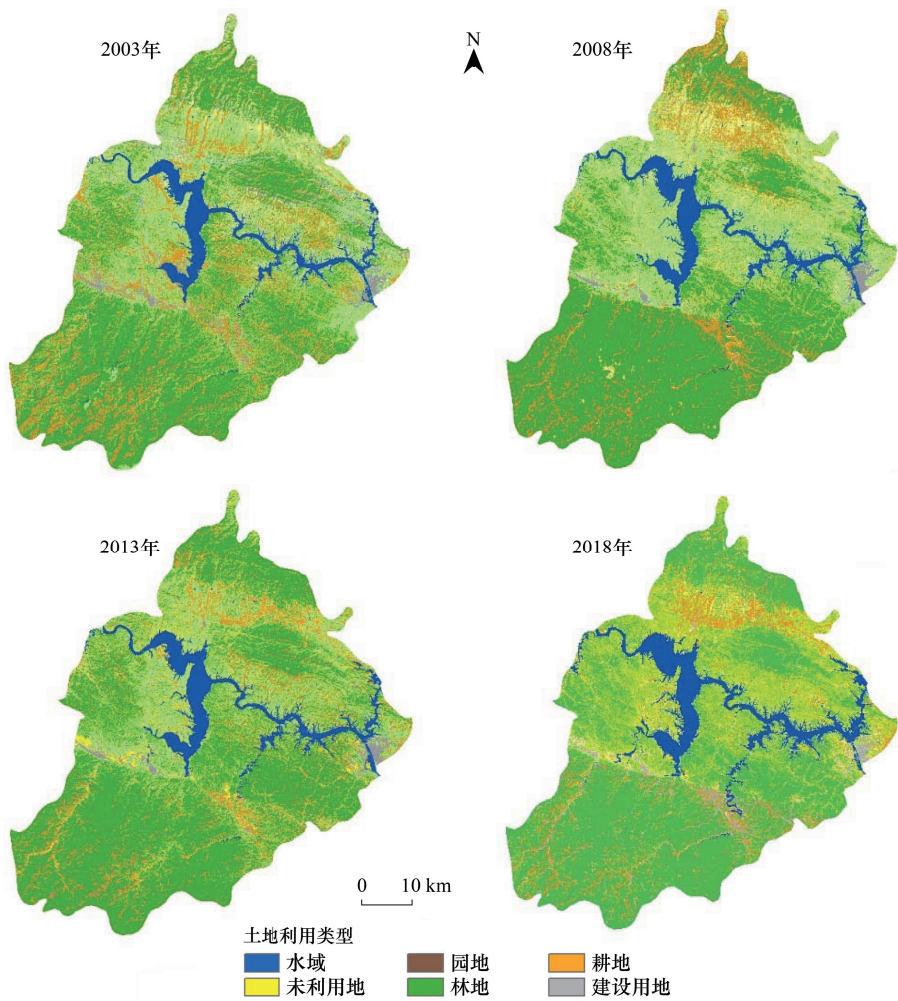


图 1 丹江口市土地利用/覆被图
Fig.1 Land use/cover map of Danjiangkou City

表 1 氮磷输出相关参数

Table 1 Output parameters of nitrogen and phosphorus			
土地利用类型 Land use type	总氮 (TN) 负荷/(kg hm ⁻² a ⁻¹) Load_total nitrogen	总磷 (TP) 负荷/(kg hm ⁻² a ⁻¹) Load_total phosphorus	截留效率/% Retention efficiency
林地 Woodland	7.3	0.5	80
水域 Water area	0	0	5
耕地 Cropland	15.3	1.65	40
园地 Orangery	17.1	1.46	50
建设用地 Urbanized land	11.5	0.75	5
未利用地 Barren land	0.05	0.05	10

2.2 氮磷净化能力研究方法

InVEST 模型水质净化模块主要基于植被土壤可通过存储、转换的方式截留径流中营养盐污染物的机理,计算每个栅格中养分元素的量,TN、TP 输出量越高表明氮磷净化能力越低,其主要算法:

$$ALV_x = HSS_x \times pol_x \tag{2}$$

式中,ALV_x是像素 x 的调整负荷值,HSS_x是像素 x 计算方法的水文敏感度评分,pol_x是像素 x 的输出系数。计算得到TN、TP输出量后,结合土地利用/覆被类型对污染物的移除效率来得到营养物保持(截留)量。

依据氮磷净化能力结果,利用水域营养类型的划分标准,结合《生态功能区划技术暂行规程》,对研究区的净化能力重要性进行分类,共分为5级(表2),以此表现区域氮磷净化能力的强弱。

表2 丹江口市TN、TP净化重要性等级

Table 2 Classification of importance of water purification in Danjiangkou City

TN 输出量/(kg hm ⁻² a ⁻¹) Output_total nitrogen	TP 输出量/(kg hm ⁻² a ⁻¹) Output_total phosphorus	重要性等级 Importance level
< 0.25	< 0.005	极重要
0.25—0.50	0.005—0.01	高度重要
0.50—0.60	0.01—0.03	中度重要
0.60—1.00	0.03—0.05	较重要
>1.00	>0.05	一般重要

2.3 景观格局指数选取

景观格局指数能有效反映生态系统与空间格局的关系,可在斑块水平、斑块类型水平和景观水平3个层次上评估景观格局变化、分析景观与水质变化的关系等^[28-29]。基于前人的基础^[30-31],本文在土地利用/覆被图的基础上利用ArcGIS和Fragstats 4.2软件,从斑块类型和景观水平层次开展研究,选取表征面积、聚集度、形状和多样性测量等8个具有代表性和广泛应用的景观指标(表3)。

表3 景观指数的选择

Table 3 The choice of landscape pattern index

名称 Name	类别 Category	含义 Meaning
斑块类型面积(CA) Class area	斑块类型水平	CA是度量其他指标的基础,值的大小影响斑块类型聚集地的物种数量及丰度。
斑块类型比(PLAND) Percent of landscape	斑块类型水平	某一斑块类型占整个景观面积的百分比,是确定景观模地或优势景观元素重要依据,决定景观中优势种和数量等生态系统指标重要因素。
最大斑块指数(LPI) Largest patch index	斑块类型水平	某一斑块类型中最大斑块占整个景观的百分比,决定景观的优劣斑块,反应景观变化受人类活动的干扰程度。
景观形状指数(LSI) Landscape shape index	景观水平	反映景观的分散和规则程度,值越大说明景观形状越复杂。
香农多样性指数(SHDI) Shannon's diversity index	景观水平	反映景观类型的多样性和异质性,对景观中各斑块类型非均衡分布状况较敏感,值增大说明斑块类型增加或各斑块类型呈均衡趋势分布。
蔓延度指数(CONTAG) Contagion index	景观水平	高蔓延度值说明景观中的某种优势斑块类型形成了良好的连接性;反之则说明景观具有多种要素的密集格局,破碎化程度较高。
散布与并列指数(IJI) Interspersion juxtaposition index	景观水平	反映斑块类型的隔离分布情况,值越小表明斑块与相同类型斑块相邻越多,而与其他类型斑块相邻的越少。
聚集度指数(AI) Aggregation index	景观水平	基于栅格数量来测度景观或者某种斑块类型的聚集程度

2.4 数据处理与统计分析

采用统计分析软件SPSS 24.0和Canoco 5.0软件,对不同时期TN、TP输出量与景观格局指数进行Pearson相关分析和冗余分析(Redundancy analysis, RDA),探究氮磷净化能力与景观格局的相关关系,利用RDA冗余分析识别各个因子贡献大小,揭示在景观尺度下氮磷净化能力变化的主要驱动。

3 结果与分析

3.1 丹江口市景观格局特征及变化

选择斑块类型和景观水平对丹江口市的景观格局开展研究,结果表明(表4),丹江口市水域面积增加,斑

块类型比和最大斑块指数总体呈上升趋势,水域占研究区面积的比例持续上升;林地面积逐年增加,从40.80%增长至50.84%,最大斑块指数先增后减表明受人类活动干扰较大;耕地与园地面积逐渐减少,耕地、园地的斑块类型比和最大斑块指数总体呈下降趋势,但依然占比较大,表明当地对耕地和园地的经营管理强度依然较大;建设用地先减后增,总体新增面积约2553 hm²,城市及镇村的发展和移民搬迁政策执行,都加剧了建设用地变化;未利用地主要包括裸地等,基本保持持平状态,因此合理开发利用裸地将成为下阶段土地利用的重点。

表4 斑块类型及景观水平景观格局指数变化情况

Table 4 Patch type and landscape level landscape pattern index changes

类型 Type	景观指数 Landscape index	年份 Year			
		2003	2008	2013	2018
水域 Water area	CA	17101	20084	23188	27617
	PLAND	5.49	6.45	7.44	8.86
	LPI	26.58	32.41	31.02	38.76
林地 Woodland	CA	127153	142091	151753	158413
	PLAND	40.81	45.60	48.70	50.84
	LPI	9.21	14.38	12.02	11.41
耕地 Cropland	CA	52277	42150	41694	36600
	PLAND	16.78	13.53	13.38	11.75
	LPI	11.92	24.47	29.66	28.94
园地 Orangery	CA	85409	78993	65765	56043
	PLAND	27.41	25.35	21.11	17.99
	LPI	26.77	23.83	22.30	18.16
建设用地 Urbanized land	CA	19400	17506	18448	21953
	PLAND	6.23	5.62	5.92	7.04
	LPI	16.63	13.53	17.12	18.18
未利用地 Barren land	CA	10240	10748	10742	10956
	PLAND	3.28	3.45	3.45	3.52
	LPI	7.12	8.07	6.18	8.98
景观水平 Landscape levels	LSI	186.85	179.33	170.78	144.47
	CONTAG	47.50	50.63	49.98	50.71
	IJI	72.30	73.39	74.35	77.88
	SHDI	1.40	1.39	1.33	1.36
	AI	85.53	89.24	86.78	88.84

景观水平上,2003—2018年景观形状指数不断减少,蔓延度指数和聚集度指数整体呈增长趋势,说明形状与相同面积的规则图形之间偏离程度逐年减小,形状复杂程度降低,斑块类型间形成了良好的连接性,景观聚集程度提升,空间分布趋向集中,景观的异质性减弱;散布与并列指数增加了5.58,香农多样性指数变幅较小,说明各斑块类型趋于规则,呈均衡趋势分布。究其原因,水库蓄水、移民搬迁、退耕还林和生态文明建设等项目的实施,社会经济发展以及人类不断活动,都加速了景观格局的变化。

3.2 氮磷净化能力时空变化与等级划分

利用InVEST模型对氮磷净化能力开展研究,其中TN、TP输出总量越大氮磷净化能力越差。结果表明(表5、图2)TN、TP单位面积输出量最大值均出现在2013年,分别为1.625 kg hm⁻² a⁻¹和0.129 kg hm⁻² a⁻¹,总输出量分别为776.979t、68.163t;但整体上看2003年TN、TP输出量最高分别为899.224t、77.308t,输出量

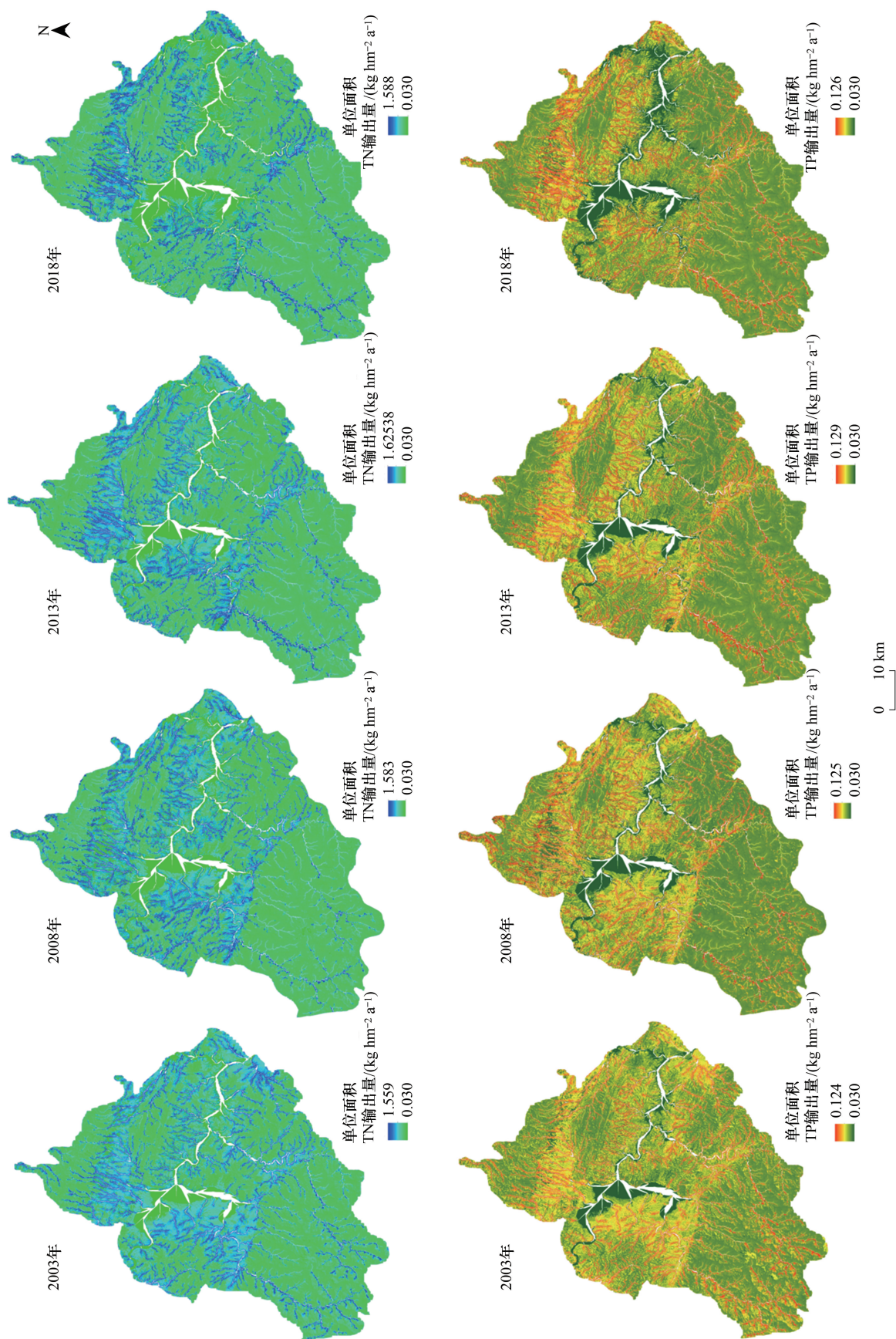


图 2 2003 年、2008 年、2013 年、2018 年单位面积 TN、TP 输出量
Fig.2 TN and TP outputs in 2003, 2008, 2013 and 2018 respectively

TN: 总氮 Total nitrogen; TP: 总磷 Total phosphorus

表 5 TN、TP 输出量
Table 5 TN and TP output

年份 Year	TN 输出量/t Output_TN	TP 输出量/t Output_TP	年份 Year	TN 输出量/t Output_TN	TP 输出量/t Output_TP
2003	899.224	77.308	2013	776.979	68.163
2008	801.481	69.921	2018	672.139	60.802

的最大值分别为 1.559 kg hm⁻² a⁻¹和 0.124 kg hm⁻² a⁻¹;2008 年 TN、TP 的输出量开始降低,输出量的最大值分别为 1.583 kg hm⁻² a⁻¹和 0.125 kg hm⁻² a⁻¹;2018 年 TN、TP 的输出量最低,总量为 672.139 t、60.802 t,其中最大值分别为 1.588 kg hm⁻² a⁻¹和 0.126 kg hm⁻² a⁻¹。

从时间上看,2003—2018 年丹江口市 TN、TP 输出量呈减少趋势,表明氮磷净化能力逐渐增强,15 年间 TN 的净化服务增强了 25.3%,TP 的净化服务增强了 21.4%;空间上看,TN、TP 输出量高的地区均分布在地势平坦和人口分布密集区。丹江口市农业以种植农作物和柑橘园为主,农药、化肥的使用是氮、磷的主要来源,有部分农业区距离水库较近,因此濒临水库处应扩大林地面积,进一步增强该区水质净化能力。

以 2018 年 TN、TP 模型输出结果为例,进行氮磷净化能力重要性等级分类,共分为 5 级(图 3)。整体上看丹江口市 2018 年氮磷水质净化重要性等级分布基本相似,特别是氮磷净化能力强,极重要区、高度重要区主要分布在库区、河流两岸和林地区域;净化能力稍弱,一般重要区主要分布在城镇建设、农田、柑橘园等。

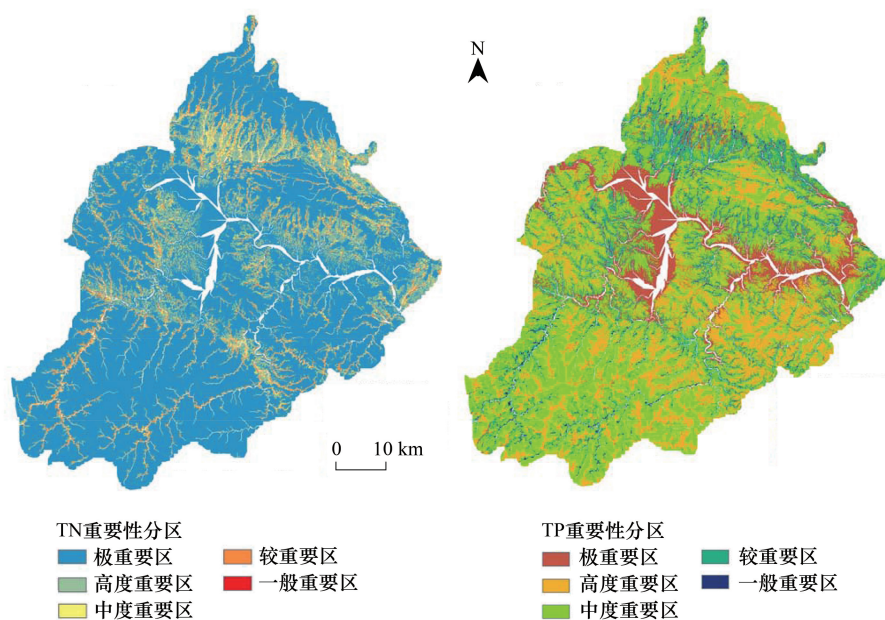


图 3 氮磷净化能力重要性等级
Fig.3 Importance level of nitrogen and phosphorus removal capacity

综上结果可知,氮磷净化能力与景观格局和土地利用类型有关,随着时空变化丹江口市近 15 年氮磷能力不断增强,较弱区域主要集中在平坦地区,这些区域植被覆盖度较低,对污染物的截留效用较弱,且耕地和柑橘园化肥农药的使用增加了氮磷的输出量;同时这些区域城镇化建设明显,人口和人类活动的增加也导致污染物排放递增,从而导致净化能力较弱;净化能力强,极重要、高度重要区主要分布在库区、河流两岸和林地等区域。

3.3 景观格局变化与氮磷净化能力的关系

由于 InVEST 模型水质净化模块主要与林地、耕地、园地和建设用地有关,利用 Pearson 相关分析结果见表 6。在斑块类型水平上,林地类型面积与氮磷输出量均呈显著负相关,表明林地可以有效拦截氮磷进入水

库;耕地、园地斑块类型面积和斑块类型比均与氮磷输出量呈正相关关系,说明农业生产是影响水质的重要因素,随着农业用地的减少,污染源的输入逐渐下降,其中耕地类型的最大斑块指数与氮磷输出呈负相关,表明耕地最大斑块指数的增加对氮磷净化能力的提升起一定的促进作用;氮磷输出量与建设用地整体上呈中等程度相关,因此城镇化发展中建设用地的增加也是影响水质变化的重要因素。

在景观水平上,氮磷输出量与景观形状指数呈显著正相关,说明 TN、TP 净化能力与景观形状的复杂度有关;与香农多样性指数呈中等程度正相关;氮磷输出量和景观聚集与分散度测量指标中蔓延度指数、聚集度指数呈负相关,和散布与并列指数表现出显著负相关,表明随着各类景观的连通性与聚集性的升高氮磷净化能力增强。

表 6 斑块类型及景观水平景观格局与 TN、TP 的关系

Table 6 The relationship between patch type and landscape horizontal landscape pattern and TN and TP

景观类型 Landscape type	景观指数 Landscape index	TN	TP	景观类型 Landscape type	景观指数 Landscape index	TN	TP
林地 Woodland	CA	-0.962 *	-0.966 *	建设用地	CA	0.581	0.562
	PLAND	-0.962 *	-0.966 *	Urbanized land	PLAND	0.577	0.558
	LPI	-0.354	-0.373		LPI	0.407	0.392
耕地 Cropland	CA	0.967 *	0.973 *	景观水平	LSI	0.958 *	0.951 *
	PLAND	0.967 *	0.972 *	Landscape levels	SHDI	0.550	0.559
	LPI	-0.858	-0.869		CONTAG	-0.836	-0.847
园地 Orangery	CA	0.949	0.948		IJI	-0.961 *	-0.954 *
	PLAND	0.950	0.948		AI	-0.700	-0.707
	LPI	0.995 **	0.993 **				

** 表示在 0.01 水平(双尾)相关性显著,* 表示在 0.05 水平(双尾)相关性显著

在景观格局与氮磷净化能力相关性分析的基础上,通过 Canoco 5.0 软件进行解释变量的前向选择,排序轴的特征值分别为 0.843 和 0.109,排序图可以很好地反映景观与氮磷净化之间的关系图 4 表明氮磷输出量与林地类型,蔓延度指数、散布与并列指数、聚集度指数呈负相关;与耕地、园地、建设用地类型,景观形状指数、香农多样性指数呈正相关,这与 Pearson 相关分析结果一致。由箭头连线的长短可看出土地利用类型依然以林地、耕地和园地对氮磷净化能力影响最大,各景观格局指数带来的影响较为均衡。

4 讨论与结论

4.1 讨论

南水北调中线工程通水后,为确保水质安全,协调库区的区域社会经济可持续发展和水环境资源保护,国务院先后批复了《丹江口库区及上游水污染防治和水土保持规范(2006 年)》、《丹江口库区及上游水污染防治和水土保持“十二五”规划(2013 年)》以及《丹江口库区及上游水污染防治和水土保持“十三五”规划(2017 年)》,随着规划的推行和实施,面源污染氮磷等元素的输出、水质变化规律和变化驱动因子成为丹江口库区水环境研究的重点。孙玉君等^[32]采用单因子评价法,对丹江口库区入库水系、水功能区以及水质指标进行了监测和分析;周颖^[33]借助 GIS 和 RS 等技术,对丹江口库区胡家山小流域等流域水质进行监测,探讨导致面源污染输出季节性差异的驱动因子,得出林地、耕地和建设用地是影响小流域水质的主要因子;张博等^[34]研究发现丹江口库区林地对面源污染的输出有拦截和削减作用,耕地则是水体氮磷污染的主要来源;丁飞霞^[35]以张家山小流域不同时期为研究对象,分别从景观数量特征和景观格局特征探讨汇水区景观特征对小流域径流水质的影响。前人研究结果与本文研究结果相似,且本文利用 InVEST 模型和景观格局结合的方法完善了丹江口库区氮磷净化时空变化研究,探讨影响水质净化功能的因素。

水质净化功能和景观格局变化的相关性研究主要分为动态和静态的研究,即通过时间和空间表征二者关

系。朱兰保等^[36]基于 GIS 和 RS 利用多年的水质数据与景观格局进行分析,研究发现景观类型是影响水质的重要因素,但未明晰水质变化与景观格局变化的关系;刘怡娜等^[37]对长江流域景观格局变化与水质净化服务的关系开展研究,表明河岸带景观格局的改变更能影响污染物的截留效率;伍恒赞等^[38]通过汇水单元和子流域划分,研究不同区域景观格局变化与水质的联系,从空间上分析了两者的相关性,但时间期限较短。本文选择以时间变化序列研究方法,从时空动态角度探讨水质净化中氮磷净化能力与景观格局的关系,整体层面研究了丹江口市近 15 年氮磷净化能力、景观格局变化以及两者间的相关性。在斑块水平上选择林地、耕地、园地和建设用地,着重探讨 4 种土地利用类型带来的影响,在景观水平上选择聚集度、形状和多样性测量等指标,进一步探究了各指标与水质净化功能的关系,也表明了营养物质累积浓度的空间分布在不同景观类型上存在差异,补充了丹江口市时空变化下景观格局与氮磷净化能力关系的空缺。

由于本文利用 InVEST 模型方法开展研究,水质净化模块阈值累积量会随着季节性产生差异,可能会引起氮、磷输出量存在误差;模型下一步应增加对其他污染物输出量的研究。

4.2 结论

丹江口市 2003—2018 年景观格局变化明显,水域面积和林地面积不断增加,耕地和园地面积逐渐减少,建设用地面积整体上呈增长趋势;景观形状指数不断减少,蔓延度指数和聚集度指数整体呈增长趋势,形状复杂程度降低,景观聚集程度提升,散布与并列指数增加了 5.58,香农多样性指数变幅较小,各斑块类型趋于规则,呈均衡趋势分布。2003 年、2008 年、2013 年和 2018 年氮磷净化能力呈持续增强趋势,其中 TN 输出总量分别为 899.224、801.481、776.979、672.149 t,TP 输出总量分别为 77.308、69.921、68.163、60.802 t,15 年间 TN、TP 的水质净化能力分别增强了 25.3%和 21.4%;对氮磷净化能力重要性等级划分发现极重要、高度重要区主要集中在库区、河流两岸和林地;氮磷净化能力稍弱,一般重要区主要在城镇建设、农田、柑橘园。利用 Pearson 相关分析和 RDA 分析发现,在斑块类型上林地面积与氮磷的输出呈显著负相关,耕地、园地和建设用地与氮磷输出量呈正相关;在景观水平上氮磷输出量与景观形状指数呈显著正相关,和散布与并列指数表现出显著负相关,与蔓延度指数、聚集度指数呈负相关。

因此,在丹江口库区氮磷输出量高的地区,应选择种植喜氮、喜磷的作物,合理施肥灌溉,可以有效降低氮磷进入水体的风险;可调节景观格局结构,合理规划土地利用,增加林地面积,建设河岸缓冲带充分滞缓径流;制定排污标准,平衡水源保护与经济发展关系,确保南水北调中线工程水源水质安全。

参考文献 (References):

- [1] 王晓学, 沈会涛, 李叙勇, 景峰. 森林水源涵养功能的多尺度内涵、过程及计量方法. 生态学报, 2013, 33(4): 1019-1030.
- [2] 赵士洞, 张永民. 生态系统与人类福祉——千年生态系统评估的成就、贡献和展望. 地球科学进展, 2006, 21(9): 895-902.
- [3] 安乐生, 赵全升, 刘贯群, 冯娟. 代表性水质评价方法的比较研究. 中国环境监测, 2010, 26(5): 47-51.
- [4] Li Z, Liu W Z, Zhang X C, Zheng F L. Assessing and regulating the impacts of climate change on water resources in the Heihe watershed on the Loess Plateau of China. Science China Earth Sciences, 2010, 53(5): 710-720.
- [5] Mishra A, Kar S, Raghuwanshi N S. Modeling nonpoint source pollutant losses from a small watershed using HSPF model. Journal of Environmental

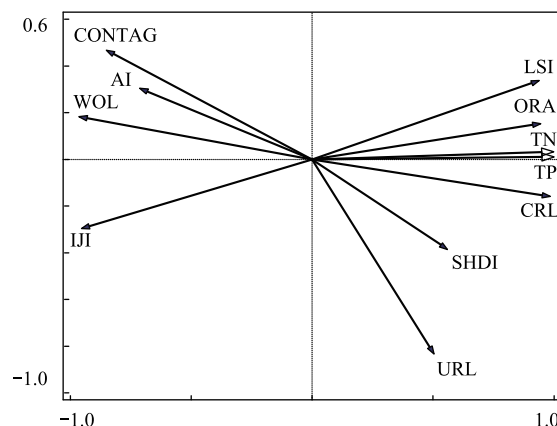


图4 景观格局指数与 TN、TP 输出量 RDA 排序图

Fig.4 RDA sorting map of landscape pattern index and TN、TP output

RDA:冗余分析 Redundancy analysis; WOL:林地 Woodland; CRL:耕地 Cropland; ORA:果园 Orangery; URL:建设用地 Urbanized land; CONTAG:蔓延度指数 Contagion index; SHDI:香农多样性指数 Shannon's diversity index; IJI:散布与并列指数 Interspersion juxtaposition index; AI:聚集度指数 Aggregation index; LSI:景观形状指数 Landscape shape index

- Engineering, 2009, 135(2): 92-100.
- [6] Hoyer R, Chang H. Assessment of freshwater ecosystem services in the Tualatin and Yamhill basins under climate change and urbanization. *Applied Geography*, 2014, 53: 402-416.
- [7] Goldstein J H, Caldarone G, Duarte T K, Ennaanay D, Hannahs N, Mendoza G, Polasky S, Wolny S, Daily G C. Integrating ecosystem-service tradeoffs into land-use decisions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(19): 7565-7570.
- [8] 王大尚, 李屹峰, 郑华, 欧阳志云. 密云水库上游流域生态系统服务功能空间特征及其与居民福祉的关系. *生态学报*, 2014, 34(1): 70-81.
- [9] 吴瑞, 刘桂环, 文一惠. 基于 InVEST 模型的官厅水库流域产水和水质净化服务时空变化. *环境科学研究*, 2017, 30(3): 406-414.
- [10] 韩会庆, 罗绪强, 游仁龙, 罗晓珊, 陈瑶. 基于 InVEST 模型的贵州省珠江流域水质净化功能分析. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2016, 40(5): 87-92.
- [11] 普军伟, 赵筱青, 顾泽贤, 卢飞飞, 郑田甜, 高翔宇, 陈俊旭, 易琦. 云南高原杞麓湖流域的景观格局与水质变化. *水生态学杂志*, 2018, 39(5): 13-21.
- [12] 刘文竹, 王晓燕, 欧洋. 密云水库小流域不同尺度景观格局与水质的相关性分析. *首都师范大学学报: 自然科学版*, 2013, 34(6): 70-75.
- [13] 任嘉衍. 伊河流域景观格局对水质的影响[D]. 开封: 河南大学, 2018.
- [14] 段少琼. 三岔河流域土地利用景观格局对水质的影响研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2016.
- [15] 赵鹏, 夏北成, 秦建桥, 赵华荣. 流域景观格局与河流水质的多变量相关分析. *生态学报*, 2012, 32(8): 2331-2341.
- [16] 李昆, 谢玉静, 孙伟, 王祥荣, 李兆华, 王玲. 农业主产区湖泊水质对湖滨带多尺度景观格局的空间响应. *应用生态学报*, 2020, 31(6): 2057-2066.
- [17] Oliveira L M D, Maillard P, De Andrade Pinto E J. Application of a land cover pollution index to model non-point pollution sources in a Brazilian watershed. *Catena*, 2017, 150: 124-132.
- [18] Rajaei F, Sari A E, Salmanmahiny A, Delavar M, Bavani A R M, Srinivasan R. Surface drainage nitrate loading estimate from agriculture fields and its relationship with landscape metrics in Tajan watershed. *Paddy and Water Environment*, 2017, 15(3): 541-552.
- [19] 王瑛. 基于景观格局分析的太湖流域宜兴段面源污染控制研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2012.
- [20] Wang L T, Wang S X, Zhou Y, Zhu J F, Zhang J Z, Hou Y F, Liu W L. Landscape pattern variation, protection measures, and land use/land cover changes in drinking water source protection areas: A case study in Danjiangkou Reservoir, China. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 21: e00827.
- [21] 张煦, 熊晶, 程继雄, 姚志鹏. 丹江口水库湖北库区水质分区及长期变化趋势. *中国环境监测*, 2016, 32(1): 64-69.
- [22] 丁霞, 程昌锦, 漆良华, 张建, 雷刚, 刘学全. 丹江口库区湖北水源区不同密度马尾松人工林水源涵养能力. *生态学杂志*, 2019, 38(8): 2291-2301.
- [23] Droogers P, Allen R G. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. *Irrigation and Drainage Systems*, 2002, 16(1): 33-45.
- [24] 薛卓彬. 基于 InVEST 模型的延河流域生态系统服务功能评估[D]. 西安: 西北大学, 2017.
- [25] 周文佐, 刘高焕, 潘剑君. 土壤有效含水量的经验估算研究——以东北黑土为例. *干旱区资源与环境*, 2003, 17(4): 88-95.
- [26] 陈姗姗. 南水北调水源区水源涵养与土壤保持生态系统服务功能研究[D]. 西安: 西北大学, 2016.
- [27] 房珊珊. 丹江口库区农用化肥非点源污染负荷及空间分布特征研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [28] 胡和兵, 刘红玉, 郝敬锋, 安静. 城市化流域生态系统服务价值时空分异特征及其对土地利用程度的响应. *生态学报*, 2013, 33(8): 2565-2576.
- [29] Dong X F, Liu L C, Wang J H, Shi J, Pan J H. Analysis of the landscape change at River Basin scale based on SPOT and TM fusion remote sensing images; a case study of the Weigou River Basin on the Chinese Loess Plateau. *International Journal of Earth Sciences*, 2009, 98(3): 651-664.
- [30] Dezhkam S, Jabbarian Amiri B, Darvishsefat A A, Sakieh Y. Performance evaluation of land change simulation models using landscape metrics. *Geocarto International*, 2017, 32(6): 655-677.
- [31] 佟光臣, 林杰, 陈杭, 顾哲衍, 唐鹏, 张金池. 1986-2013 年南京市土地利用/覆被景观格局时空变化及驱动力因素分析. *水土保持研究*, 2017, 24(2): 240-245.
- [32] 孙玉君, 李丹华. 南水北调中线工程水源区水质现状分析. *人民长江*, 2016, 47(14): 15-18.
- [33] 周颖. 丹江口库区流域面源污染输出规律与养分收支研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018.
- [34] 张博, 王书航, 姜霞, 王雯雯, 赵丽. 丹江口库区土地利用格局与水质响应关系. *环境科学研究*, 2016, 29(9): 1303-1310.
- [35] 丁飞霞. 丹江口库区小流域汇水区景观特征对径流水质的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019.
- [36] 朱兰保, 盛蒂, 戚晓明, 杜庆才, 丁艳. 基于 RS 和 GIS 的景观格局变化对城市湖泊水质影响的研究. *重庆科技学院学报: 自然科学版*, 2014, 16(1): 102-105.
- [37] 刘怡娜, 孔令桥, 肖焱, 郑华. 长江流域景观格局变化对生态系统水质净化服务的影响. *环境保护科学*, 2018, 44(4): 6-13.
- [38] 伍恒赞, 张起明, 齐述华, 胡梅. 土地利用景观格局对信江水质的影响. *中国环境监测*, 2014, 30(3): 166-172.