

褚钰, 朱九龙, 付景保. 南水北调中线水源地农业面源污染时空演化特征[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(4): 800-809.
CHU Y, ZHU J L, FU J B. Temporal and spatial evolution characteristics of agricultural non-point source pollution in water source of the Middle Route of the South-to-North Water Transfers Project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(4): 800-809. (in Chinese)

南水北调中线水源地农业面源污染时空演化特征

褚钰¹, 朱九龙², 付景保¹

(1. 河南工程学院南水北调与黄河流域生态环境研究中心, 郑州 451191; 2. 南阳理工学院范蠡商学院, 河南 南阳 473004)

摘要: 基于清单分析法对 2010—2019 年南水北调中线水源地农业面源污染物 TN 和 TP 的排放量进行测算, 并结合 ArcGIS 软件对其时空演变特征进行分析。结果表明: 2010—2019 年, 南水北调中线水源地农业面源污染物 TN 负荷和 TP 负荷整体上呈现先增加后减少的趋势; TN 和 TP 污染强度呈先升后降趋势; 化肥、畜禽养殖和农村生活是水源地农业面源污染 TN 和 TP 负荷的主要来源, 且化肥比重缓慢增加, 畜禽养殖比重不断下降, 农村生活比重不断增加。研究结果可为中线水源地农业面源污染治理、生态保护等方面政策及措施的制定提供决策支持。

关键词: 南水北调中线; 水源地; 农业面源污染; 清单分析法; 时空演化特征

中图分类号: X52 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0078

南水北调中线工程是为了解决我国水资源时空分布不均, 缓解日益突出的水资源供需矛盾而实施的跨流域调水工程。自工程通水以来, 有效缓解北京、天津、河北等沿线城市的用水紧缺程度^[1], 已成为沿线城市的供水生命线, 为我国经济社会发展和生态环境保护发挥着重要的支撑作用^[2]。经过“十一五”(2006—2010)、“十二五”(2011—2015)、“十三五”(2016—2020)三期水污染防治和水土保持规划, 中线水源地源污染和农业面源污染得到一定缓解, 但面源污染依然是影响水源地水质的主要因素: 在丹江口水库入库污染总量中, 面源污染占绝对优势, 在化学元素的形态上, 面源污染对水体的影响主要表现为以溶解态为主的氮和以颗粒状为主的磷^[3]。因此, 分析中线水源地农业面源污染演化特征对水源地水质保护和保证“一库清水永续北上”具有重要意义。

农业面源污染治理是开展水环境保护的重要活动之一。为掌握特定区域农业面源污染的排放情况, 国内外学者从不同尺度采用不同方法对不同区域的农业面源污染测算和评价展开了研究。在研究尺度方面, 学者们从流域^[4-5]、国家^[6-7]、区域^[8-11]等

不同的研究尺度进行了农业面源污染测算和分析; 在研究方法上, 主要采用产污系数法^[4]、等标污染法、分形理论^[10]、GIS^[12-14]、SWAT^[14-15]等方法。其中, 产污系数法由于不用考虑复杂的产污过程^[16], 计算方法较为简便, 在水文数据缺乏的情况下, 能够借助各类统计数据展开计算, 且能在较长时间和较大尺度上评估区域农业面源污染原始特征, 得到了广泛使用^[17]。围绕南水北调中线水源地农业面源污染, 学者们采用输出系数法对丹江流域不同土地利用类型、畜禽养殖、农村人口的面源污染物输出系数进行了计算^[18], 以问卷调查形式对水源地谭家湾流域的面源污染负荷进行了估计^[13], 采用平均浓度法估算了流域内面源污染负荷量及潜在因子的污染负荷贡献率^[13,19], 从空间角度基于压力-状态-响应模型采用等标污染负荷法对 2007 年水源地农业面源污染负荷的空间分布特征^[20]及变化趋势进行了分析^[21]。这些研究主要围绕水源地污染物输出系数、水源地某个子区域及水源地主要入库河流的农业面源污染负荷演变特征等展开研究。本文在已有研究的基础上, 收集整理相关数据, 采用清单分析法对 2010—2019 年水源地农业面源污染的主要负

收稿日期: 2023-03-28 修回日期: 2023-07-12 网络出版时间: 2023-07-20

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20230720.0955.002>

基金项目: 国家自然科学基金项目(71804042; 42077449); 国家社会科学基金项目(21BGL248); 河南省哲学社会科学规划项目(2022BJJ036); 河南省高等学校青年骨干教师培养计划(2021GGJS160); 河南省重大科技专项项目(221100320200)

作者简介: 褚钰(1984—), 女, 河南郑州人, 副教授, 博士, 主要从事资源配置与环境治理研究。E-mail: cychuyu@163.com

荷 TN 和 TP 进行计算,并结合 ArcGIS 进一步对水源地 TN 和 TP 负荷的时空演化特征开展分析,以期中线水源地农业面源污染治理提供决策支持。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域

南水北调中线(以下简称“中线”)水源地包括

丹江口库区、汉江及丹江的部分支流区域,地处甘肃、陕西、河南、四川、湖北、重庆 6 省(直辖市)交接地带^[22],考虑甘肃、四川以及河南的洛阳、三门峡仅涉及 1 个县(市),同时考虑数据的可获取性,论文选取汉中、安康、商洛、十堰、南阳 5 个地区作为主要研究区域,其中南阳市主要涉及内乡县、西峡县、淅川县和邓州市,见图 1。



图 1 研究区域及区域内主要水系

Fig. 1 Study area and the main river systems in the area

1.2 农业面源污染负荷的计算方法

农业面源污染受农业生产、气候、土壤等因素的影响,其数据难以收集。清单分析法主要依据面源污染物的源排放量、产污系数等对污染负荷进行计算,由于其规避了复杂的污染过程推演,且数据可获得性高,得到了广泛的应用。本文根据清单分析法的计算逻辑,将中线水源地农业面源污染源划分为三级结构:类别、单元、指标。其中类别指的是引起农业面源污染的生产和生活类型,单元指的是将不同类别生产和生活类型进行细分,计量指标指的是对不同农业面源污染单元进行数据统计的计量单位。农业面源污染造成的环境问题主要是 TN 和 TP 过度排放引起水体富营养化,农作物种植化肥施用量、农作物废弃物、畜禽养殖、水产养殖、生活污水等^[23]引起的面源污染已经成为中线水源地 TN 和 TP 的主要来源^[24]。主要采用清单分析法结合产污系数法从这 5 个方面对水源地农业面源污染 TN 和 TP 负荷进行核算,见表 1。

根据清单分析法,农业面源污染负荷的计算方法有如下几种。

1.2.1 化肥产生的污染负荷计算

农业生产对化肥的过度依赖引起化肥施用过量并使其成为面源污染的主要成因^[25]。在农作物耕种过程中,农户通常施用化肥来增加耕地的肥力。化肥施用后,部分被农作物吸收,部分残留在耕地中。

残留在耕地中的化肥在灌溉及降雨过程中通过排水系统及地表径流等途径进入地表或地下水形成污染。化肥产生的 TN 和 TP 污染负荷可通过氮肥、磷肥(以磷铵为主)、复合肥的施用折纯量乘以相应的系数计算,计算公式为

$$C_{N,kt} = (C_{1,kt} + 0.3C_{2,kt} + 0.185C_{3,kt}) \times 0.2 \times 0.6 \quad (1)$$

$$C_{P,kt} = (0.3C_{2,kt} + C_{3,kt}) \times 0.15 \times 0.6 \quad (2)$$

式中: $C_{N,kt}$ 和 $C_{P,kt}$ 分别表示 t 年区域 k 作物耕种施用化肥产生的 TN 和 TP 负荷, t ; $C_{1,kt}$ 表示 t 年区域 k 氮肥施用折纯量, t ; $C_{2,kt}$ 表示 t 年区域 k 复合肥施用折纯量, t ; $C_{3,kt}$ 表示 t 年区域 k 磷肥施用折纯量, t 。氮肥、复合肥、磷肥中含 TN 的系数分别为 1.000、0.300、0.185, 含 TP 的系数分别为 0、0.3、1.0。式(1)中 0.2 和 0.6 分别为 3 种化肥中 TN 的输出系数和入河系数,式(2)中 0.15 和 0.6 分别为复合肥和磷肥中 TP 的输出系数和入河系数,系数设定参考已有文献^[21]。

1.2.2 畜禽养殖产生的污染负荷计算

畜禽养殖产生的污染负荷计算公式为

$$S_{N,kt} = \left(\sum_{m=1}^M Q_{km} \cdot 365 E_m \cdot \alpha_{N,m} \cdot \beta_{N,m} \right) / 1000 \quad (3)$$

$$S_{P,kt} = \left(\sum_{m=1}^M Q_{km} \cdot 365 E_m \cdot \alpha_{P,m} \cdot \beta_{P,m} \right) / 1000 \quad (4)$$

式中: $S_{N,kt}$ 和 $S_{P,kt}$ 为 t 年区域 k 畜禽养殖产生的 TN 和 TP 负荷, t ; m 为区域 k 畜禽养殖种类 ($m \in [1, 4]$); Q_{km} 为 t 年区域 k 养殖 m 类牲畜的年末存栏量, 头 (或只); E_m 为 m 类牲畜的单位日粪便排泄量, kg ; $\alpha_{N,m}$ 和 $\alpha_{P,m}$ 为 m 类牲畜粪便中 TN 和 TP 的质量分数, %; $\beta_{N,m}$ 和 $\beta_{P,m}$ 为 m 类牲畜中 TN 和 TP 的入河系数, %。具体系数设定见表 2^[21]。

表 1 水源地农业面源污染清单分析

Tab. 1 The inventory analysis of agricultural non-point source pollution in water source area

类别	单元	计量单元及计算单位
化肥	氮肥	施用量(折纯量)/t
	磷肥	施用量(折纯量)/t
	复合肥	施用量(折纯量)/t
畜禽养殖	大牲畜(牛)	年末存栏量/头
	猪	年末存栏量/头
	羊	年末存栏量/只
	家禽	年末存栏量/只
水产养殖	水产	养殖产量/t
	水稻	总产量/t
作物废弃物	小麦	总产量/t
	玉米	总产量/t
	油料	总产量/t
农村生活	人	乡村人口/人

表 2 畜禽养殖产生污染负荷系数

Tab. 2 Discharge coefficients of non-point pollution from livestock and poultry breeding

指标	大牲畜($m=1$)	猪($m=2$)	羊($m=3$)	家禽($m=4$)
日粪便排泄量 E_m/kg	25.0	3.5	2.0	0.1
TN 质量分数 $\alpha_{N,m}/\%$	0.44	0.59	0.75	0.99
TN 入河系数 $\beta_{N,m}/\%$	5.68	5.25	5.30	8.47
TP 质量分数 $\alpha_{P,m}/\%$	0.12	0.34	0.26	0.58
TP 入河系数 $\beta_{P,m}/\%$	5.50	5.25	5.20	8.42

1.2.3 水产养殖污染负荷计算

水产养殖污染负荷采用排污系数法核算, 计算公式为

$$A_{N,kt} = R_k e_N / 1\,000 \quad (5)$$

$$A_{P,kt} = R_k e_P / 1\,000 \quad (6)$$

式中: $A_{N,kt}$ 和 $A_{P,kt}$ 为 t 年区域 k 水产养殖产生的 TN 和 TP 负荷, t ; R_k 为 t 年区域 k 水产养殖的产量, t ; e_N 和 e_P 是水产养殖 TN 和 TP 的排污系数, kg/t , 具体系数设定见表 3。

表 3 水产养殖业排污系数^[26]

Tab. 3 Discharge coefficients of non-point pollution from aquaculture

省份	$e_N/(\text{kg}\cdot\text{t}^{-1})$	$e_P/(\text{kg}\cdot\text{t}^{-1})$
河南	2.087	0.048
陕西	2.612	0.242
湖北	1.345	0.095

1.2.4 作物废弃物污染负荷计算

作物废弃物主要为秸秆。水源地农作物中, 小麦、稻谷、玉米、油料的播种面积较大, 因此, 作物废弃物来源主要包括小麦、稻谷、玉米、油料产生的秸秆。作物废弃物污染负荷计算公式为

$$W_{N,kt} = \sum_{n=1}^N A_{kn} q_n (1 - \varepsilon) \sigma_N \sigma_0 \quad (7)$$

$$W_{P,kt} = \sum_{n=1}^N A_{kn} q_n (1 - \varepsilon) \sigma_P \sigma_0 \quad (8)$$

式中: $W_{N,kt}$ 和 $W_{P,kt}$ 为 t 年区域 k 作物废弃物产生的 TN 和 TP 负荷, t ; A_{kn} 为 t 年作物 n 的年产量 ($n \in [1, 4]$), t ; q_n 为作物 n 的草谷比系数, 指的是农作物秸秆的发生量与作物产量之间的比例^[27]; ε 为秸秆利用率, 取值 38.63%; σ_N 和 σ_P 为作物秸秆中 TN 和 TP 的质量分数, %; σ_0 为秸秆入河系数, 取值 1%。其他参数取值见表 4。

表 4 作物草谷比系数及秸秆中 TN、TP 质量分数

Tab. 4 The mass fraction of different grains to straw and the quantity of TN and TP in the straw

指标	小麦 ($n=1$)	玉米 ($n=2$)	稻谷 ($n=3$)	油料 ($n=4$)
草谷比系数 q_n	1.34	1.23	0.97	2.14
秸秆中 TN 质量分数 $\sigma_N/\%$	0.48	0.48	0.48	0.48
秸秆中 TP 质量分数 $\sigma_P/\%$	0.38	0.38	0.38	0.38

1.2.5 农村生活污染负荷计算

农村生活污染负荷主要包括人们生活产生的固体垃圾、生活污水及人粪尿等。具体计算公式为

$$L_{N,kt} = [P_{kt} s w_N \gamma_w / 1\,000 + P_{kt} 365 l_N (1 - \delta_N) / 1\,000 + P_{kt} H_1 h] / 1\,000 \quad (9)$$

$$L_{P,kt} = [P_{kt} s w_P \gamma_w / 1\,000 + P_{kt} 365 l_P (1 - \delta_P) / 1\,000 + P_{kt} H_2 h] / 1\,000 \quad (10)$$

式中: $L_{N,kt}$ 和 $L_{P,kt}$ 为 t 年农村生活污染产生的 TN 和 TP 负荷, t ; P_{kt} 为 t 年区域 k 的农村人口数, 人; s 为单位固体垃圾产生量, 取值 $s=270 \text{ g/a}$ ^[20]; w_N 和 w_P 为固体垃圾 TN 和 TP 质量分数, 分别取值 0.455% 和 0.117%; γ_w 为生活垃圾入河系数, 取值 3%; l_N 和 l_P 为

单位生活污水中 TN 和 TP 的产污强度, $g/(人 \cdot d)$; δ_N 和 δ_P 为 TN 和 TP 的综合去除率, %; H_N 和 H_P 为单位人粪尿产生 TN 和 TP 量, 分别取值 3.06 kg/a 和 0.524 kg/a ; h 为人粪尿入河系数, 取值 10% ^[18]。式(9)和(10)中的污染物产污强度和综合去除率根据生态环保部发布的《排放源统计调查产排污核算方法和系数手册》^[26], 见表 5。

表 5 农村生活污水污染物产污强度及污染物综合去除率
Tab. 5 Pollution intensity of domestic sewage in rural areas and the comprehensive removal rate of pollutants

省份	污染物产污强度 [$g \cdot (人 \cdot d)^{-1}$]		污染物综合去除率/%	
	l_N	l_P	δ_N	δ_P
河南(南阳市)	0.93	0.08	0.47	0.46
陕西(汉中市)	1.44	0.14	0.43	0.46
陕西(安康市)	1.77	0.17	0.43	0.46
陕西(商洛市)	0.67	0.07	0.43	0.46
湖北(十堰市)	2.87	0.25	0.46	0.48

1.2.6 水源地污染物总负荷计算

水源地污染物 TN 和 TP 的总负荷为各类别产生污染物总量之和, 计算公式为

$$T_{N,\text{sum}} = C_{N,kt} + S_{N,kt} + A_{N,kt} + W_{N,kt} + L_{N,kt} \quad (11)$$

$$T_{P,\text{sum}} = C_{P,kt} + S_{P,kt} + A_{P,kt} + W_{P,kt} + L_{P,kt} \quad (12)$$

式中: $T_{N,\text{sum}}$ 和 $T_{P,\text{sum}}$ 为污染物 TN 和 TP 的总负荷, t。

1.2.7 农业面源污染物污染强度计算

水源地各子区域社会经济发展不平衡, 子区域的经济状况、农业产业结构、人口基数、耕地面积等存在区域差异性, 从而导致农业面源污染负荷的总量也存在一定的差异。由于农业面源污染物与其承载的土地面积密切相关, 因此, 用各子区域农业面源污染物负荷量与其耕地面积比表示各子区域的污染物污染强度 [式(13)和(14)], 通过比较水源地各子区域的农业面源污染物污染强度来反映水源地各子区域的农业面源污染负荷水平。

$$Q_N = Y_N/A \quad (13)$$

$$Q_P = Y_P/A \quad (14)$$

式中: Q_N 和 Q_P 为子区域污染物 TN 和 TP 的污染强度, kg/hm^2 ; Y_N 和 Y_P 为子区域污染物 TN 和 TP 的负荷量, kg; A 为耕地面积, hm^2 。

2 中线水源地农业面源污染演变的时空特征

2.1 数据来源

水源地农业面源污染所用社会数据主要来自于 2011—2020 年陕西、河南省统计年鉴及农

村统计年鉴, 2011—2020 年汉中、安康、商洛、河南、南阳、浙川、西峡、内乡、湖北、十堰等各市统计年鉴及农村统计年鉴等。其中, 根据数据的可获取性, 对水源地汉中市、商洛市、安康市、十堰市的农业面源污染 TN 和 TP 负荷相关数据采用市级尺度进行收集, 对南阳市内的水源地西峡、浙川、内乡、邓州的农业面源污染 TN 和 TP 负荷相关数据采用县级尺度进行收集。部分年份缺少的数据采用插值法进行补充; 汉中市、安康市氮肥、磷肥、复合肥数据缺少, 根据各市的总化肥折纯量与陕西省总化肥折纯量比值乘以陕西省各类化肥折纯量计算得到。

2.2 水源地农业面源污染演化的时间特征

从整体上看, 2010—2019 年中线水源地 TN 总负荷和 TP 总负荷呈现先增加后减少的趋势, 与相关研究一致^[21], 分别从 2010 年的 $60\,462.77 \text{ t}$ 、 $19\,135.59 \text{ t}$ 下降至 2019 年的 $55\,151.99 \text{ t}$ 、 $18\,946.37 \text{ t}$ 。其间, 在 2012 年前呈缓慢增长趋势, 2012 年后呈缓慢下降趋势, 下降速度在 2017 年前后有所增加。见图 2。从水源地各子区域的角度看, 各子区 TN 负荷变化存在显著差异。具体来讲, 可以分为 4 类区域: 汉中、安康、十堰的 TN 负荷较大, 2010—2019 年, TN 的最低污染负荷量均在 $8\,000 \text{ t}$ 以上, 但近年来 3 个市的 TN 负荷量均呈下降趋势, 尤其是 2017 年后, TN 下降速度尤为显著; 邓州 TN 负荷量波动较大, 2011 年和 2017 年增加幅度较大, 2016 年大幅下降; 商洛、浙川的 TN 负荷量适中, 其中商洛和浙川的 TN 负荷整体呈缓慢下降趋势; 内乡、西峡的 TN 负荷较小, 且变化不大。

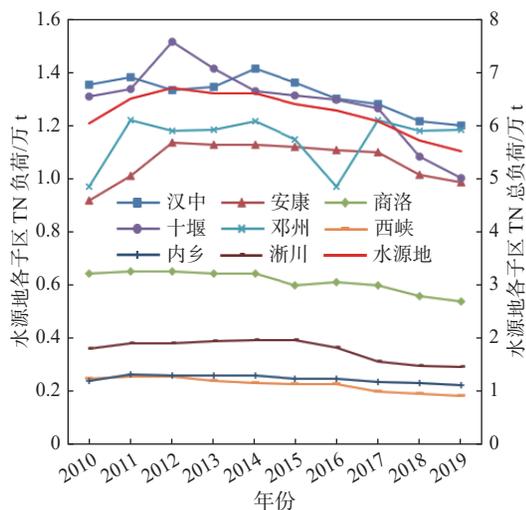


图 2 中线水源地农业面源污染负荷 TN 的时间演化趋势
Fig. 2 The temporal evolution trend of non-point source pollution load TN in the water source of the middle route

根据图 3 可以看出,水源地子区域 TP 负荷变化差异和子区域 TN 负荷的变化趋势类似,可分为 3 类区域:邓州市的 TP 负荷在 2014 年前,呈显著增长趋势,由 2010 年的 4 099 t 增加至 2014 年的 5 721 t,2014 年后保持平稳状态;汉中、十堰、安康的 TP 负荷在 2012 年前呈缓慢增长趋势,2012—2017 年,汉中和安康保持平稳状态,十堰先显著下降后保持平稳状态,2017 年后 3 个市均缓慢下降;商洛、西峡、内乡、浙川的 TP 负荷整体保持平稳缓慢下降状态。

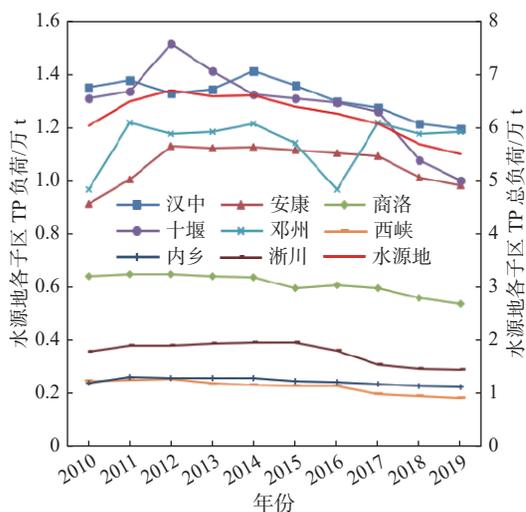


图 3 中线工程水源地农业面源污染负荷 TP 的时间演化趋势

Fig. 3 The temporal evolution trend of non-point source pollution load TP in the water source of the middle route

2.3 水源地农业面源污染演化的空间特征

根据图 4 可以看出,2010—2019 年水源地整体 TN 污染强度呈先升后降趋势,2013 年、2016 年逐渐增加后,2019 年开始下降。从整体上来看:十堰、邓州、汉中的 TN 污染强度普遍较高,污染强度均值分别达到 71.8、67.8 和 63.8 kg/hm²,均高于水源地 2010—2019 年的 TN 污染强度均值(58 kg/hm²);西峡、内乡污染强度相对较低,污染强度均值分别为 35.2 和 40.7 kg/hm²。

根据图 5 可以看出,2010—2019 年水源地 TP 污染强度呈先升后降趋势,2013 年、2016 年逐渐增加后,2019 年开始下降。从整体上来看:邓州 TP 的污染强度高,污染强度均值达到 31.2 kg/hm²、十堰次之,污染强度为 22.1 kg/hm²,均高于水源地 2010—2019 年 TP 的污染强度均值(19.5 kg/hm²);商洛、西峡的污染强度相对较低,污染强度均值分别为 10.9 kg/hm²、14.6 kg/hm²。

本部分与其他学者的研究得出了不同的结论。王彦东^[21]认为西峡、浙川、十堰的 TN 和 TP 污染强度较高,汉中、邓州、内乡的 TN 和 TP 污染强度相对较低。研究结论发生变化的主要原因在于后者研究的时间范围为 2016 年前,本部分的研究范围包含了 2016—2019 年,丹江口库区及上游地区水污染防治“十三五”规划 2016 年开始实施,其间水源地各级政府加大面源污染治理力度,尤其是位于水源地核心的西峡和浙川的环境治理力度更大,从而使得水源地各子区 TN 和 TP 污染强度的均值(表 6)相较已有研究发生了变化。

3 水源地农业面源污染演化的结构特征

水源地农业面源污染 TN 负荷的首要来源为化肥,如图 6 所示,2010—2019 年水源地各子区由化肥产生的 TN 负荷均达到了 55% 以上,且较多达到了 70%~80%,并呈现缓慢增加趋势。畜禽养殖、农村生活是水源地农业面源污染 TN 的另外两个主要来源。2010 年 TN 负荷畜禽养殖来源比重内乡县最高,达到 32.6%,其次为浙川县和安康市,分别达到 21.9% 和 21.3%,其余各子区均在 15.0% 左右。随着近年来水源地农业面源污染治理的开展,水源地各子区 TN 负荷畜禽养殖来源整体均呈下降趋势,其中,浙川县下降最为明显,由 21.9% 下降至 5.2%。2010 年 TN 负荷农村生活来源比重安康最高,达到 17.7%,其余依此为十堰(16.2%)、商洛和汉中(13.4% 和 13.3%)、内乡(10.7%)、浙川(8%)、邓州(7.5%)和西峡(7.3%);2010—2019 年,水源地各子区 TN 负荷农村生活来源比重均呈先降后升趋势。水源地各子区 TN 负荷水产养殖和农业废弃物来源比重普遍均较低。

水源地农业面源污染 TP 负荷的首要来源为化肥,如图 7 所示,2010—2019 年水源地各子区由化肥产生的 TP 负荷均达到了 54% 以上,且整体呈现缓慢增加趋势。畜禽养殖是水源地农业面源污染 TP 的另外一个主要来源。2010 年 TP 负荷畜禽养殖来源比重安康最高,达到 36.3%,其次为内乡(33.1%)、商洛(29.9%)、汉中市(27.9%)、浙川(23.6%),十堰市(22.2%)、邓州市和西峡县均为 15% 左右;但 2010—2019 年水源地各子区 TP 负荷畜禽养殖来源整体呈下降趋势,其中,浙川下降最为明显,由 23.6% 下降至 5.6%。2010—2019 年 TP 负荷农村生活来源比重商洛最高,达到 9.2%,其余

依此为安康(8.3%),汉中和十堰(6.6%和5.8%),内乡、浙川、邓州、西峡为3%左右;2010—2019年,

水源地各子区TN负荷农村生活来源比重均呈先降后升趋势。

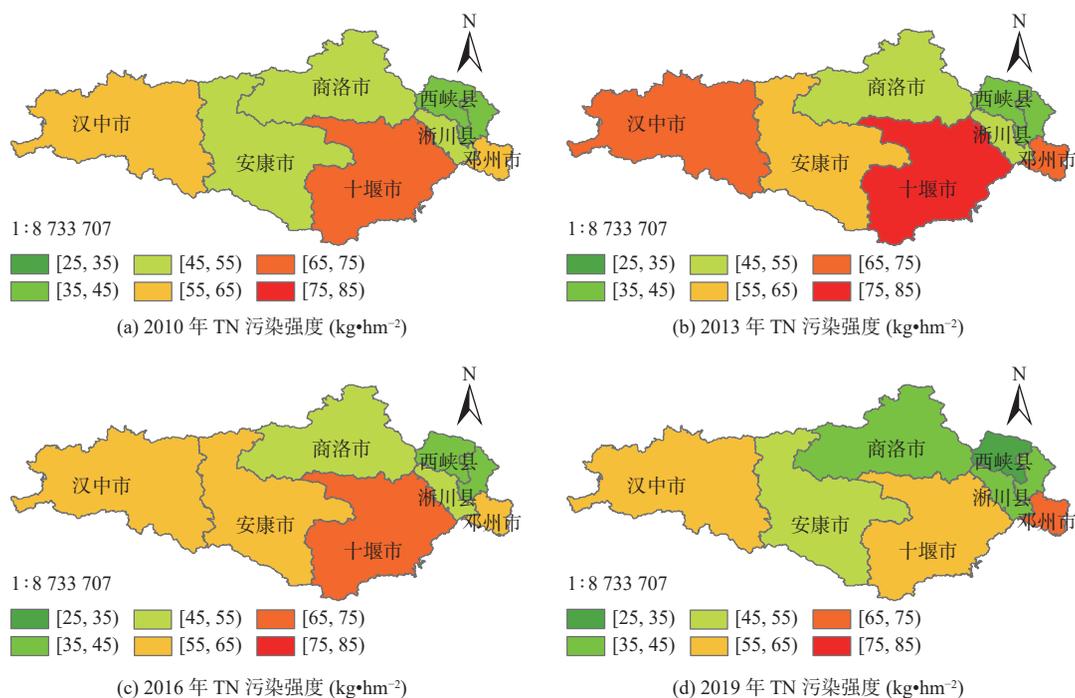


图4 2010—2019 中线水源地农业面源污染 TN 污染强度的空间分布

Fig. 4 The spatial distribution of TN intensity in water source of the middle route from 2010 to 2019

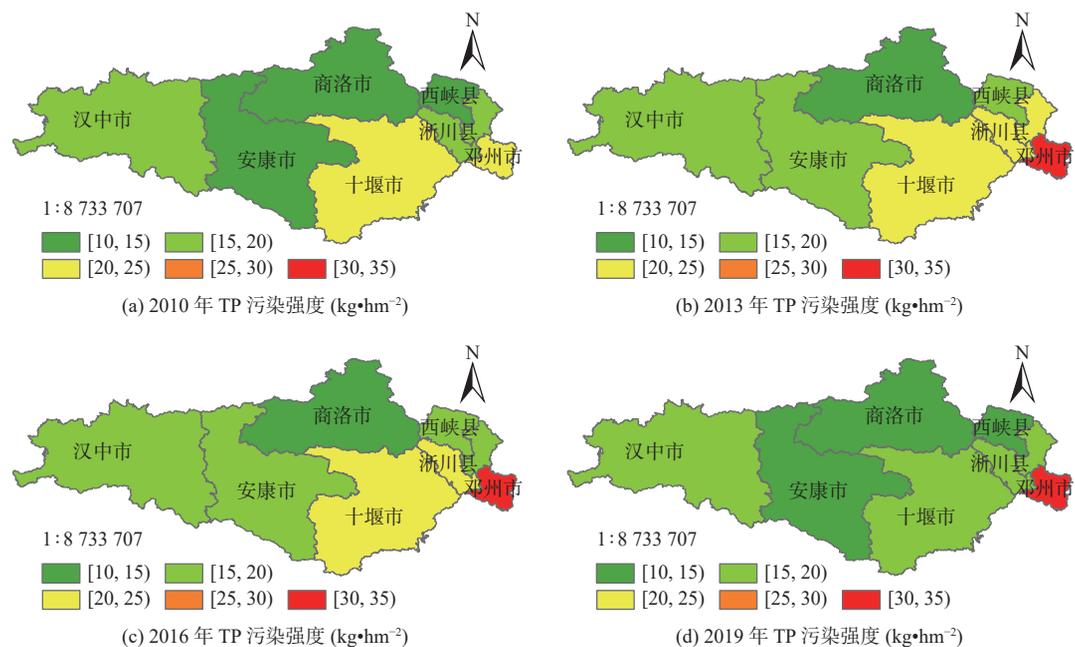


图5 2010—2019 中线水源地农业面源污染 TP 污染强度的空间分布

Fig. 5 The spatial distribution of TP intensity in water source of the middle route from 2010 to 2019

综上,水源地农业面源污染TN和TP的结构特征呈相同的演变趋势,化肥、畜禽养殖和农村生活是水源地农业面源污染TN和TP负荷的主要来源,这与相关研究^[21]结论一致。其中,化肥占比最大,其比重呈缓慢增加的趋势,畜禽养殖比重不断下降,农村生活比重不断增加。化肥占比变化趋势与已

有研究^[21]一致,而农村生活占比变化趋势与已有研究^[21]不同,主要原因在于已有研究以2010年的数值作为比较值,农村生活占比整体下降,但实际上,本部分根据计算结果发现尽管农村生活占比相较于2010年呈整体下降趋势,但以2012年为拐点,其占比呈上升趋势,但数值未超过2010年占比。

表 6 2010—2019 年中线水源地污染负荷 TN 和 TP 污染强度均值

Tab. 6 The mean values of TN and TP intensity in water source of the middle route from 2010 to 2019

区域	汉中	安康	商洛	十堰	邓州	西峡	内乡	浙川	水源地
TN污染强度均值/(kg·hm ⁻²)	63.8	54.3	46.0	71.8	67.8	35.2	40.7	50.6	58.0
TP污染强度均值/(kg·hm ⁻²)	18.2	15.5	10.9	22.1	31.2	14.6	19.3	19.8	19.5

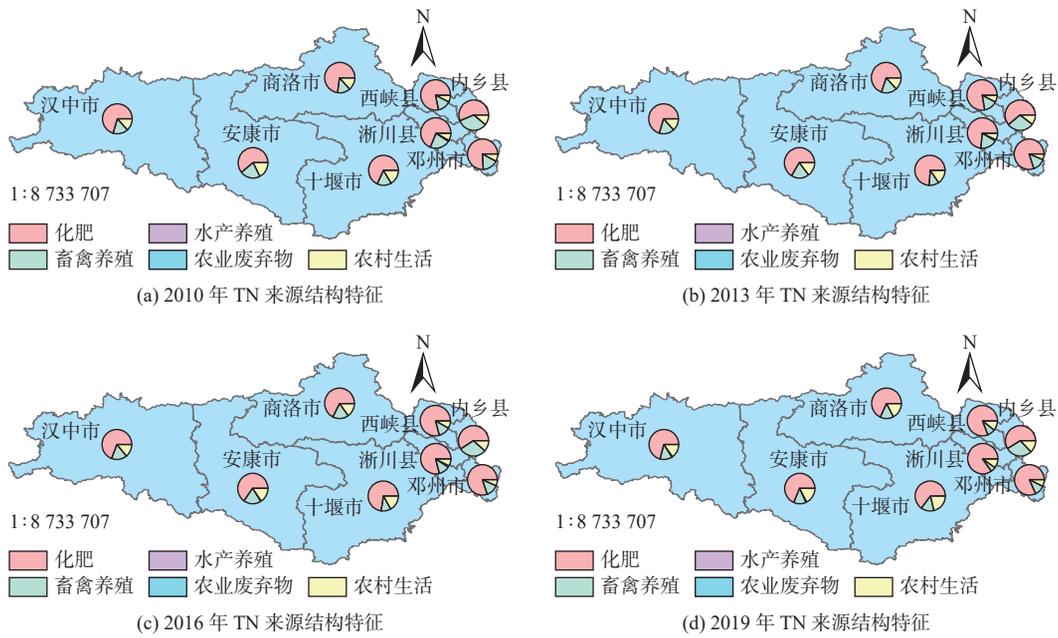


图 6 中线水源地农业面源污染负荷 TN 来源结构特征

Fig. 6 The structural features of TN of regions in water source of the middle route

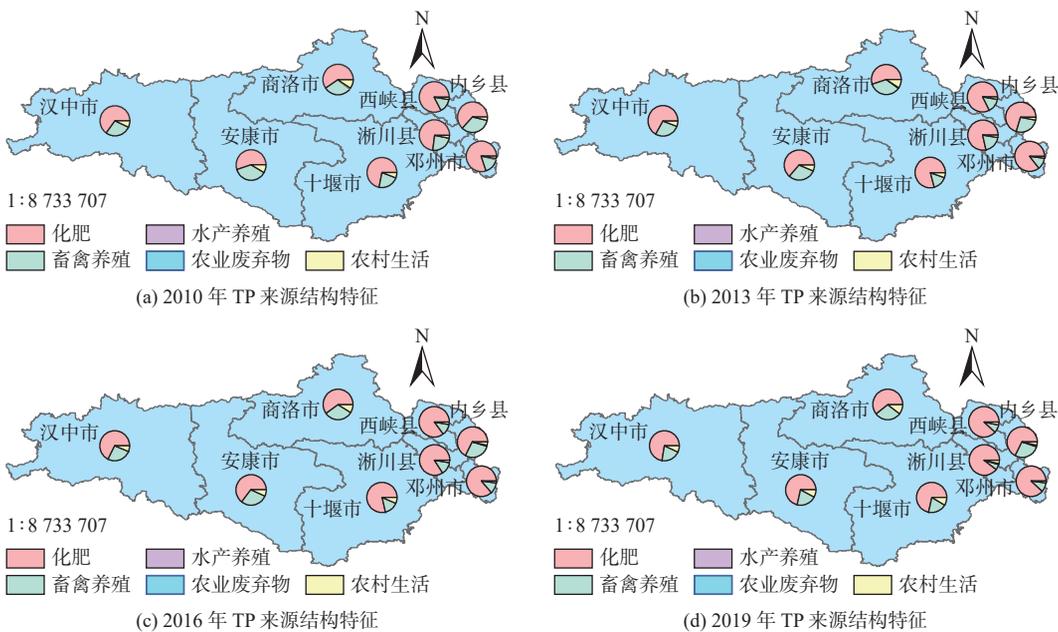


图 7 中线水源地农业面源污染负荷 TP 来源结构

Fig. 7 The structural features of TP of regions in water source of the middle route

4 结论

2010—2019 年, 中线水源地农业面源污染 TN 负荷和 TP 负荷整体呈现先增加后减少的趋势, 水

源地整体 TN、TP 污染强度均呈先升后降趋势, 且水源地南部地区污染物强度普遍高于水源地北部地区。这一结论表明近年来中线水源地持续实施

“十一五”“十二五”“十三五”3期水污染防治和水土保持规划的效果显著,如建立生态清洁小流域、全面开展农村污染治理、大力开展美丽乡村建设、推行“厕所革命”新建农村农户无害厕所等,使得中线水源地丹江口水库的水质稳定在国家地表水Ⅱ类标准以上。因此,中线水源地农业面源污染的治理需要持续开展。

水源地农业面源污染 TN 和 TP 的结构特征呈现相似的特征,化肥、畜禽养殖和农村生活是水源地农业面源污染 TN 和 TP 负荷的主要来源,其中化肥占比最大,其比重呈缓慢增加的趋势,畜禽养殖比重不断下降,农村生活比重不断增加。根据这一特征,中线水源地各地方政府应贯彻《丹江口库区及上游水污染防治和水土保持“十四五”规划》,有效推进化肥减量增效,通过宣传、补贴、培训等方式增强农户主观规范^[28],促进农户采用有机肥,实施水肥一体化、测土配方施肥等技术,优化和调整农业结构^[29],逐渐建立现代农业体系;严格控制畜禽养殖的规模^[17],加快畜禽养殖粪污处理设施建设,对有机废弃物进行无害化处理^[30],探索种养结合;完善水源地农村基础设施,建立农村生活废弃物收运处置体系,推动农村生活废弃物资源化利用。

参考文献:

- [1] 翟家齐,赵勇,赵纪芳,等.南水北调来水对京津冀地区用水竞争力的影响[J].*南水北调与水利科技(中英文)*,2022,20(3):440-450. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0044.
- [2] 曾子悦,许继军,吴光东,等.南水北调中线一期工程生态效益评估:以北京市为例[J].*南水北调与水利科技(中英文)*,2022,20(6):1168-1178. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0115.
- [3] 李慧峰,白景锋,武兵兵.丹江口水库面源污染调查及治理方法探究[J].*南阳师范学院学报*,2014,13(9):43-48. DOI: 10.3969/j.issn.1671-6132.2014.09.013.
- [4] 郭利京,黄振英.淮河生态经济带农业面源污染空间分布及治理研究[J].*长江流域资源与环境*,2021,30(7):1746-1756. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj202107021.
- [5] 李家科,彭凯,郝改瑞,等.黄河流域非点源污染负荷量化与控制研究进展[J].*水资源保护*,2021,37(1):90-102. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2021.01.014.
- [6] 王思如,杨大文,孙金华,等.我国农业面源污染现状与特征分析[J].*水资源保护*,2021,37(4):140-147,172. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2021.04.021.
- [7] 徐新良,陈建洪,张雄一.我国农田面源污染时空演变特征分析[J].*中国农业大学学报*,2021,26(12):157-165. DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2021.12.16.
- [8] 史龙新,李向阳,王宁,等.太湖地区农村面源污染控制技术与对策[J].*中国水利*,2006(17):11-13,46. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2006.17.007.
- [9] 刘增进,祁秉宇,张关超.南水北调中线工程水源地河南段水质现状及污染分析[J].*华北水利水电大学学报(自然科学版)*,2017,38(2):77-81. DOI: 10.3969/j.issn.1002-5634.2017.02.015.
- [10] 贾陈忠,乔扬源.基于等标污染负荷法的山西省农业面源污染特征研究[J].*中国农业资源与区划*,2021,42(3):141-149. DOI: 10.7621/cjarrp.1005-9121.20210317.
- [11] 王国重,李中原,左其亭,等.丹江口水库水源区农业面源污染物流失量估算[J].*环境科学研究*,2017,30(3):415-422. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2017.01.74.
- [12] 付景保,孙庆辉,魏涛.基于GIS的南水北调中线水源区生态环境监测体系平台构建[J].*南水北调与水利科技*,2013,11(4):119-123. DOI: 10.3724/SP.J.1201.2013.04119.
- [13] 龚世飞,丁武汉,肖能武,等.丹江口水库核心水源区典型流域农业面源污染特征[J].*农业环境科学学报*,2019,38(12):2816-2825. DOI: 10.11654/jaes.2019-0288.
- [14] CORWIN D L, LOGUE K R. Modeling nonpoint source pollutants in the Vadose zone with GIS[J].*Environmental Science & Technology*,1997,31(8):2157-2175. DOI: 10.1021/es960796v.
- [15] ZHANG X Q, CHEN P, DAI S N, et al. Analysis of non-point source nitrogen pollution in watersheds based on SWAT model[J].*Ecological Indicators*,2022,138(4):108881. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.108881.
- [16] ZOU L L, LIU Y S, WANG Y S, et al. Assessment and analysis of agricultural non-point source pollution loads in China: 1978-2017[J].*Journal of Environmental Management*,2020,263:110400. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110400.
- [17] 葛小君,黄斌,袁再健,等.近20年来广东省农业面源污染负荷时空变化与来源分析[J].*环境科学*,

- 2022, 43(6): 3118-3127. DOI: [10.13227/j.hjkk.202108071](https://doi.org/10.13227/j.hjkk.202108071).
- [18] 刘宇轩. 丹江流域非点源氮磷污染负荷及其对土地利用变化的响应研究[D]. 武汉: 长江科学院, 2020.
- [19] 龚世飞, 丁武汉, 居学海, 等. 典型农业小流域面源污染源解析与控制策略: 以丹江口水源涵养区为例[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(18): 3919-3931. DOI: [10.3864/j.issn.0578-1752.2021.18.011](https://doi.org/10.3864/j.issn.0578-1752.2021.18.011).
- [20] 姜世英, 韩鹏, 贾振邦, 等. 南水北调中线丹江口库区农业面源污染PSR评价与基于GIS的空间特征分析[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(11): 2153-2162.
- [21] 王彦东. 南水北调中线水源地农业面源污染特征及农户环境行为研究[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2019.
- [22] 左其亭, 王妍, 陶洁, 等. 南水北调中线水源地水文特征分析及其水资源适应性利用的思考[J]. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(4): 42-49. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdkq.2018.0095](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdkq.2018.0095).
- [23] 杨益. 南水北调中线水源地农业面源污染防治对策研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2010, 8(4): 31-34. DOI: [10.3969/SP.J.1201.2010.04031](https://doi.org/10.3969/SP.J.1201.2010.04031).
- [24] 王超, 贾海燕, 雷俊山, 等. 南水北调中线水源地小流域面源污染生态阻控[J]. *环境工程学报*, 2020, 14(10): 2615-2623. DOI: [10.12030/j.cjee.202002069](https://doi.org/10.12030/j.cjee.202002069).
- [25] 张晓楠, 邱国玉. 化肥对我国水环境安全的影响及过量施用的成因分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(4): 104-114. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdkq.2019.0090](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdkq.2019.0090).
- [26] 排放源统计调查产排污核算方法和系数手册. 中华人民共和国生态环境部公告[Z]. 2021年第24号.
- [27] 刘晓永. 中国农业生产中的养分平衡与需求研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.
- [28] WANG Y D, YANG J, LIANG J P, et al. Analysis of the environmental behavior of farmers for non-point source pollution control and management in a water source protection area in China[J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 633: 1126-1135. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2018.03.273](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.273).
- [29] WANG H, LIU C, XIONG L C, et al. The spatial spillover effect and impact paths of agricultural industry agglomeration on agricultural non-point source pollution: A case study in Yangtze River Delta, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 401: 136600. DOI: [10.1016/j.jclepro.2023.136600](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136600).
- [30] WANG R J, WANG Q B, DONG L S, et al. Cleaner agricultural production in drinking-water source areas for the control of non-point source pollution in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 285: 112096. DOI: [10.1016/j.jenvman.2021.112096](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112096).

Temporal and spatial evolution characteristics of agricultural non-point source pollution in water source of the Middle Route of the South-to-North Water Transfers Project

CHU Yu¹, ZHU Jiulong², FU Jingbao¹

(1. Eco-environment Research Center for South-to-North Water Transfer and Yellow River Basin, Henan University of Engineering, Zhengzhou 450001, China; 2. Fan Li Business School, Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004, China)

Abstract: The South-to-North Water Transfers Project has become the water supply lifeline of cities along the project and plays an important supporting role in their economic and social development and eco-environment protection. As several water pollution controls and soil and water conservation plans have taken effect, non-point source pollution is becoming the main factor affecting the water quality. To ensure continuous water supply, it is of great significance for water quality protection to analyze the evolution characteristics of non-point source pollution in the water source area of the middle route project.

The inventory analysis method is used to calculate non-point source pollution load in the water source area. Three-level structure including category, unit, and index was used to analyze the main agricultural non-point source pollution sources. The calculation formulas of non-point source pollution load in the water source area were formed using pollution coefficients. The non-point source pollution loads of TN and TP from 2010 to 2019 of regions in

water source areas were calculated, and the spatial and temporal evolution characteristics of the non-point source pollution load of regions in water source areas were analyzed with ArcGIS.

From 2010 to 2019, the overall trends of TN and TP load of non-point source pollution in the middle route increased first and then decreased. The pollution intensities of TN and TP also increased first and then decreased. The trends of structural characteristics of TN and TP of non-point source pollution in water source were the same. Chemical fertilizer, livestock and poultry breeding, and rural life were the main source of non-point source pollution TN and TP in water source. Chemical fertilizer accounted for the largest proportion and its proportion showed a slowly increasing trend, the proportion of livestock and poultry breeding kept declining, and the proportion of rural life was increasing.

The control activities of non-point source pollution of water source areas in the middle route should be continuous. Rural household should be guided and encouraged to use environmental friendly organic fertilizers. Other activities also need to be carried out, such as improving rural infrastructures, establishing a system for collecting, transporting, and disposing of rural household waste, and promoting the utilization of rural household waste as resources.

Key words: the Middle Route of the South-to-North Water Transfers Project; water source; non-point source pollution; inventory analysis; temporal and spatial evolution characteristics