

DOI: 10.5846/stxb202005211295

黄斌斌, 李若男, 李睿达, 郑华, 王效科. 雄安新区上游白洋淀流域水质净化提升目标下的生态恢复格局优化. 生态学报, 2020, 40(20): 7143-7152.
Huang B B, Li R N, Li R D, Zheng H, Wang X K. Optimization of ecological restoration pattern targeted for water purification improvement in the Baiyangdian watershed, Xiong'an New Area. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(20): 7143-7152.

雄安新区上游白洋淀流域水质净化提升目标下的生态恢复格局优化

黄斌斌^{1,2}, 李若男^{1,2,*}, 李睿达^{1,2}, 郑 华^{1,2}, 王效科^{1,2}

1 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 白洋淀流域是雄安新区重要的淡水来源之一, 流域内退耕政策在改善水质同时大幅降低了农田面积。如何通过退耕空间规则的优化权衡水质净化效率与农田面积是亟待解决的问题。通过设置基于不同退耕规则的情景, 并与实际情景对比, 提出了退耕规则的优化方案。结果表明: 相同面积下, 河岸带退耕的水质净化效率高于坡耕地退耕; 相同退耕规则下, 退耕还林驱动的水质净化效率高于还灌, 还草; 单位面积河岸带退耕的水质净化效率随缓冲区距离增加而降低; 300m 河岸带退耕还林情景下的水质净化率提升高于其他所有模拟情景, 也比实际退耕情景 (2015) 高, 同时农田面积降幅也低于实际情景。研究表明通过对退耕规则进行空间优化不仅能够满足区域水质净化提升的目标, 还有利于保障区域农田面积, 减少生态系统服务间的权衡。

关键词: 水质净化; 雄安新区; 河岸带; 白洋淀流域; 退耕

Optimization of ecological restoration pattern targeted for water purification improvement in the Baiyangdian watershed, Xiong'an New Area

HUANG Binbin^{1,2}, LI Ruonan^{1,2,*}, LI Ruida^{1,2}, ZHENG Hua^{1,2}, WANG Xiaoke^{1,2}

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Baiyangdian watershed is one of the important freshwater sources in the Xiong'an New Area. To protect the ecological environment, a series of ecological restoration projects have been implemented since the 1980s. The projects improved the ecological environment but with the reduction in farmland area as cost. Therefore, this study tried to find a better way to optimize the rules of the farmland conversion to reduce trade-off between the improvement of water quality purification and the decrease of farmland area by setting up different scenarios of farmland conversion. The results show that: In the condition that converts farmland with the same area, the efficiency of returning farmland in the riparian zone is higher than the slope field; In the condition that converts farmland under the same rule, the water quality purification efficiency of returning farmland into forest is higher than returning farmland into shrubland or grassland. The improvement rate of per unit water quality purification is reduced with the increase of buffer distance in the riparian zone. Under the scenario that returning farmland into forest in 300 m riparian zone, the improvement of water quality purification rate is higher than that of the actual scenario (2015), but the reduction in farmland area is lower than that of the actual scenario

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (41871218, 41871217); 国家重点研发计划项目 (2018YFC0507303, 2018YFC0506902)

收稿日期: 2020-05-21; **修订日期:** 2020-09-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: Rnli@rcees.ac.cn

(2015). By optimizing the rules of returning farmland, the pattern of ecosystem restoration can be appropriately optimized. And it is not only conducive to improve the target ecosystem services, but also reduced trade-off between different ecosystem services improvement goals.

Key Words: water purification; Xiong'an New Area; riparian zone; Baiyangdian watershed; conversion of farmland

农业扩张带来的面源污染使得水污染情况日益严重,水环境安全面临挑战^[1-2]。退耕还林还草等生态恢复工程通过对区域景观格局的改变,影响流域生态过程,进而影响水质净化服务^[3-4]。通过制定并实施合理的退耕原则,从污染物输入及污染物迁移转化能力等方面提升流域水质净化服务和效率对生态恢复工程管理和区域生态质量提升具有重要意义。

水质净化服务受景观类型影响,森林、灌丛和草地具有较强的水质净化服务功能,而农田和城镇的水质净化服务功能较弱^[5]。在景观格局水平上,斑块面积、形状和破碎程度都会对水质净化服务产生影响^[5-6]。平均斑块面积的减少,斑块形状的规则化以及景观破碎程度的增加都会导致水质净化服务的下降^[7-8]。其中退耕还林还草政策在众多研究和实践过程中被证明是提高水质净化服务的一种重要手段而被持续推广和广泛应用^[9-11]。然而不合理的退耕会造成水质净化效率下降,无法保证生态系统数量、质量及功能的同步提升。

传统退耕方式以坡耕地退耕为主,此类退耕方式的特点是零散化、破碎化、且退耕区域多集中在流域上游山区^[11-12]。其优点是能够有效提高土壤固持能力,防止水土流失,减少泥沙进入河流^[13]。而针对水质净化服务提升,坡耕地退耕是否仍为最佳退耕模式仍有待商榷。与此同时,已有众多研究表明河岸带在污染物防控方面起重要作用^[14-15]。刘怡娜等人通过研究发现长江流域河岸带 1000m 范围内的景观变化解释了 79% 的水质净化服务空间变异^[16]。Zheng 等人研究指出通过保护和恢复河岸带自然植被可以有效减少生态系统服务间的权衡作用,使绝大多数生态系统服务呈现出上升趋势^[17]。这些研究表明河岸带退耕是一种行之有效的退耕方式。

基于此,本研究以雄安新区所在的白洋淀流域为例,以 1980 年为基准,识别不同的退耕规则下流域景观格局变化,并与 2015 年实际退耕格局进行对比;采用 InVEST 模型中水质净化模块评估不同情境下流域水质净化服务功能;分析不同情境下水质净化服务的效率、差异及其驱动因素,为提升流域水质净化服务和优化生态恢复格局提供参考。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

雄安新区上游的白洋淀流域,属于海河流域大清河水系^[18],年降水量在 550mm 左右,是典型的温带大陆性气候,属半干旱半湿润气候区。区域内超过 80% 的降水集中分布在 6 月至 9 月^[19]。白洋淀流域由大清河山区和大清河淀西平原两个子流域组成,面积占比分别为 53% 和 47%。其中大清河山区植被类型主要以森林和灌丛为主,农田面积较少,而大清河淀西平原植被类型主要以农田为主^[20]。多年农业生产带来的面源污染使得流域内水质恶化,随着区域人口增长、经济发展以及雄安新区的规划使得当地生活和生产用水需求不断增加,对流域水质安全提出了新的挑战。为改善流域水环境现状,提升生态质量,自 2000 年以来“退耕还林还草”等生态工程陆续实施,用于缓解农业带来的面源污染及生态环境恶化^[18]。

1.2 研究方法

1.2.1 水质净化服务计算方法

本研究利用 InVEST 模型的 NDR 模块来表征水质净化服务。由于 NDR 模块运行依赖于 water yield 产水模块输出的产水量作为输入数据驱动其运行,因此研究中需首先运行 water yield 模块进行产水量计算,然后再运行 NDR 模块。

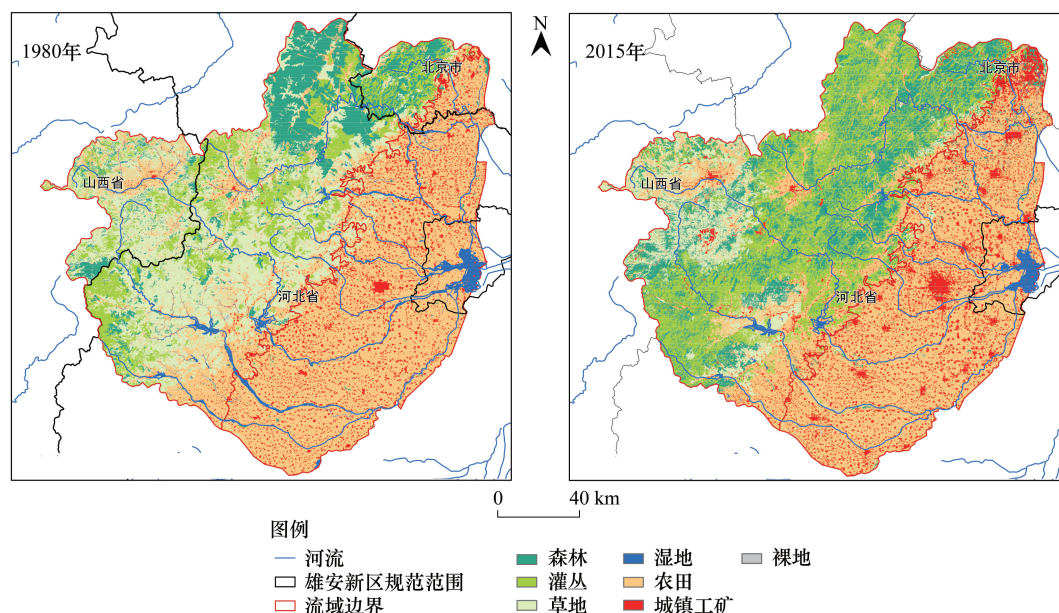


图1 白洋淀流域 1980 年和 2015 年土地利用及地理位置

Fig.1 Land use in 1980/2015 and location of Baiyangdian basin

(1) 产水量计算

产水量计算通过 InVEST 模型的 water yield 年产水量模块进行^[21],该模块基于水量平衡方程研究,认为水资源供给量为年降水量与年实际蒸散发之差^[22](公式 1):

$$R = PRE - AET \quad (1)$$

式中, R 为年水资源供给量(mm), PRE 为年降水量(mm), AET 为年实际蒸散发量(mm)。AET 的计算利用基于 budyko 水热平衡假设的 zhang 模型进行计算^[23](公式 2):

$$AET = \left(1 + \frac{PET}{PRE} - \left(1 + \left(\frac{PET}{PRE} \right)^w \right)^{1/w} \right) \times PRE \quad (2)$$

式中, PET 为年潜在蒸散发(mm), w 为经验参数,可通过公式 3 进行计算:

$$w = Z \frac{AWC}{PRE} + 1.25 \quad (3)$$

式中, Z 为经验常数,与流域的气候和水文特征有关; AWC 为植被可获得体积水含量(mm),主要与植被类型和土壤属性有关。 Z 和 AWC 的取值参考 InVEST 官方的指导手册(<http://releases.naturalcapitalproject.org/invest-userguide/latest/reservoirhydropowerproduction.html>)。

(2) 水质净化服务计算

水质净化服务通过 InVEST 模型的营养物质传输模块 NDR 进行计算,NDR 模块基于栅格数据在年尺度上运行,通过简化的水文和生物物理过程来估算植被和土壤对净化非点源污染的贡献^[24]。该模型可以用来计算营养物质的输入,持留和输出量,同时依赖 water yield 模块的年产水量作为驱动数据。此外该模块还需要高程、土地利用和生物物理参数表作为输入数据。本文以水质净化率作为衡量指标来评估水质净化服务。主要计算理论过程可简化为公式 4 所示:

$$WPR = \left(1 - \frac{N_{\text{export}}}{N_{\text{load}}} \right) \times 100\% \quad (4)$$

式中, WPR 为水质净化率,用来表征水质净化能力的强弱; N_{export} 为氮输出量; N_{load} 为氮输入量,主要与土地利用类型和管理措施有关。模型中相关的参数设置参考国内外已出版的相关文献^[5,16,21]。

1.2.2 土地利用变化情景设置

退耕还林还草政策是提升水质净化能力的一种重要举措,为分析不同退耕空间规则提升水质净化效率的表现,本研究设置了三类退耕情景。(1)坡耕地退耕:包括 25°以上坡耕地退耕以及 15°以上坡耕地退耕。其中 25°以上坡耕地退耕作为退耕的依据之一在生态恢复工程中被广泛采纳,在一些生态系统服务重要以及生态敏感和脆弱区域执行 15°以上坡耕地退耕;(2)河岸带退耕:依次设置河岸带周边 100m,200m 和 300m 等不同缓冲区退耕情景。此情景的设置基于对河岸带生态对流域水质的重要性 and 永定河河岸带的治理效果^[14-15,25];(3)真实情景:包括历史情景(S1980)和现状情景(S2015),用来进行对照以及分析实际土地利用变化对水质净化的影响。退耕情景设置以 1980 年土地利用为基础,根据退耕规则进行不同情景的划分,相关具体信息如表 1 所示。

表 1 退耕情景设置

Table 1 Scenario of returning farmland in Baiyangdian basin

情景类型 Scenario type	情景编号 Scenario number	退耕规则 Farmland conversion rule	生态恢复规则 Ecological restoration rule
模拟情景 Simulated scenario	S1-1	25°以上农田退耕	森林恢复
	S1-2		灌丛恢复
	S1-3		草地恢复
	S2-1	15°以上农田退耕	森林恢复
	S2-2		灌丛恢复
	S2-3		草地恢复
	S3-1	河岸带 100m 缓冲区范围内农田退耕	森林恢复
	S3-2		灌丛恢复
	S3-3		草地恢复
	S4-1	河岸带 200m 缓冲区范围内农田退耕	森林恢复
	S4-2		灌丛恢复
	S4-3		草地恢复
	S5-1	河岸带 300m 缓冲区范围内农田退耕	森林恢复
	S5-2		灌丛恢复
	S5-3		草地恢复
真实情景 Real scenario	S1980	—	1980 年实际土地利用
	S2015	—	2015 年实际土地利用

2 数据来源

本研究所使用的数据种类较多,包括土地利用/覆盖数据,气象数据,潜在蒸散发,土壤数据和 DEM 高程数据等。具体的数据来源与处理情况如表 2 所示:

3 结果与分析

3.1 真实状况下土地利用/覆被和水质净化服务变化

从 2015 年白洋淀流域土地利用占比来看,农田面积比例最大,达 40.51%(1.27 万 km²)(图 2)。森林、灌丛和草地的面积占比分别为 15.48%(0.48 万 km²),23.45%(0.73 万 km²)和 8.73%(0.27 万 km²)(图 2)。湿地和裸地的面积最小,面积比例分别为 1.18%和 0.18%(图 2)。与 1980 年相比,2015 年白洋淀流域森林和灌丛面积比例显著提高,分别提高了 50.86%(1632.39 km²)和 101.16%(3688.04 km²)(图 2)。草地、湿地和农田面积比例显著减少,分别减少了 64.94%(5058.35 km²)、53.64%(426.21 km²)和 8.49%(1174.88 km²)(图 2)。通过分析土地利用/覆被转移可以发现主要原因是草地和农田向森林和灌丛进行转化,共有

1439.78 km²和 370.06 km²的草地和农田化为森林以及 3501.40 km²和 633.05 km²的草地和农田转化灌丛(图 2)。

表 2 数据来源及处理说明
Table 2 Data source and processing instructions

数据类型 Data type	数据来源 Data source	处理说明 Processing instructions
土地利用/覆被数据 Land use/Land cover	1980 土地利用/覆被-中国 1:25 万土地覆盖遥感调查与监测数据库 (http://www.geodata.cn/); 2015 年土地利用/覆被数据-中国系统评估与生态安全数据库 (http://www.ecosystem.csdb.cn/)	两期数据重采样成 90m 分辨率,并将分类体系调整后划分为森林、灌丛、草地、湿地、农田、城镇工矿和裸地共 7 种土地利用/覆被类型
气象数据 Climate data	中国科学院资源环境科学数据中心 (http://www.resdc.cn)	ANUSPLIN 软件薄盘样条函数插值形成 1980—2015 逐月平均气温和年降水量空间数据集 ^[26]
潜在蒸散发 Potential evapotranspiration	基于空间插值后的气温和降水数据	Haimon 蒸散发公式生成逐月潜在蒸散发数据集 ^[27]
土壤数据 Soil data	世界土壤数据库 (HWSD) 土壤数据集 (http://www.fao.org/)	—
DEM 高程数据 DEM data	地理空间数据云 (http://www.gscloud.cn/)	—

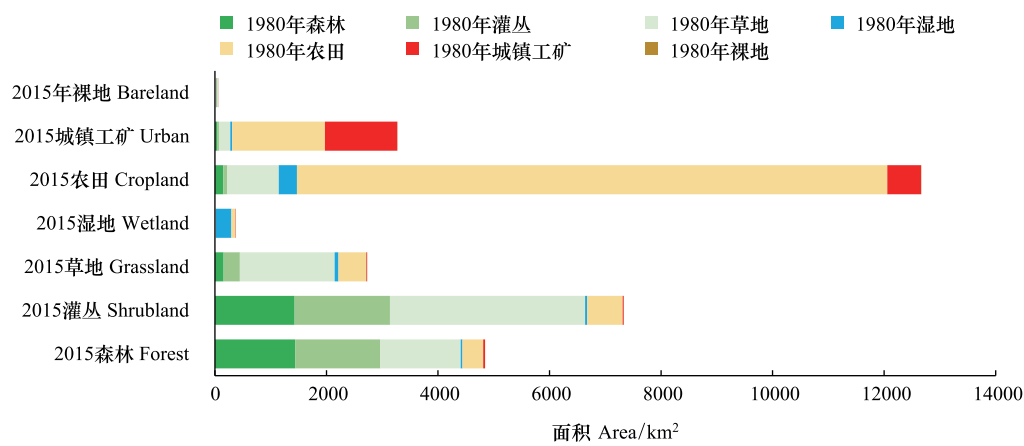


图 2 1980—2015 年土地利用变化图
Fig.2 Land use/land cover change between 1980 and 2015

2015 年,白洋淀流域平均水质净化率为 82.81%,其中森林的水质净化率最高,达 91%,其次是灌丛和草地,水质净化率分别为 87.80%和 82.28%(表 3)。与 1980 年相比,平均水质净化率增加了 1.97%。其中森林和灌丛的水质净化率有所提升,而草地的水质净化率有所降低(表 3)。从不同单项土地利用/覆被转移对水质净化服务的影响来看,总体上其他土地利用/覆被类型转化为湿地的水质净化率提升程度最大,而湿地转化为其他土地利用/覆被类型的水质净化率下降最大。其中裸地转化为湿地的水质净化率提升幅度最大,达 94.50%;而湿地转化为裸地的水质净化率下降幅度最大,达 69.73%(表 3)。

3.2 不同退耕情景下的退耕面积及效率变化

从退耕面积来看,河岸带退耕(S3-S4-S5)面积大于坡耕地退耕(S1-S2)。其中河岸带 300m 缓冲带退耕相关情景(S5)下的农田面积减少最大(7.19%),林灌草面积增加最大(6.80%);25°以上农田退耕情景(S1)下农田面积减小最少(0.21%),林灌草面积增加最小(0.31%)(图 3)。与实际退耕情景相比(S2015),河岸带退

耕相关情景 (S3-S4-S5) 的林灌草面积增幅均高于实际情景, 农田面积降幅均低于实际情景 (图 3)。

表 3 1980—2015 年土地利用转化对平均水质净化率的影响/%

Table 3 Effect of land use/land cover transfer on water purification rate between 1980 and 2015

1980	2015							
	森林 Forest	灌丛 Shrubland	草地 Grassland	湿地 Wetland	农田 Farmland	城镇工矿 Urban	裸地 Bare land	全区 Total
森林 Forest	0.35	-2.75	-6.44	35.98	-15.98	-36.83	-38.46	90.12
灌丛 Shrubland	4.99	2.06	-1.35	45.18	-12.35	-34.00	-33.11	86.14
草地 Grassland	8.72	5.34	2.05	41.09	-9.20	-30.43	-29.82	82.58
湿地 Wetland	-22.77	-38.45	-41.52	0.00	-46.46	-67.85	-69.73	11.41
农田 Farmland	20.28	20.19	12.76	46.36	1.69	-17.14	-19.46	72.08
城镇工矿 Urban	45.04	55.09	42.11	50.63	24.93	4.94	9.51	59.99
裸地 Bare land	59.07	56.48	36.11	94.50	35.21	6.66	4.94	50.92
全区 Total	91.00	87.80	82.28	9.60	73.46	64.14	56.68	-

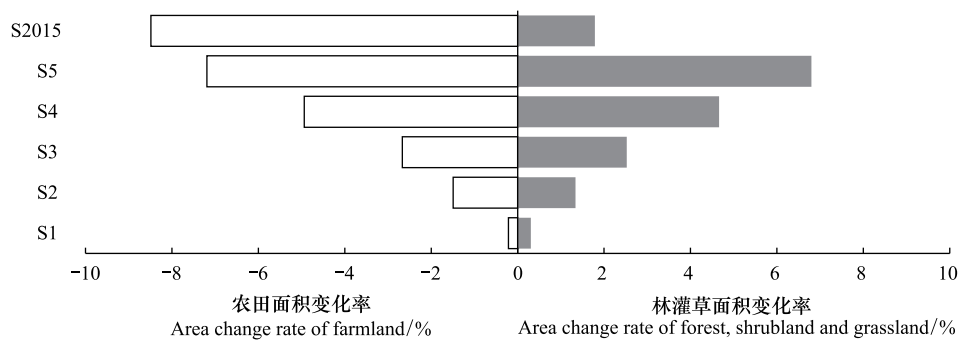


图 3 不同情景下与退耕有关的土地利用/覆被类型面积变化

Fig.3 Area change in land use/cover type related to conversion of farmland under different scenarios

退耕效率上, 河岸带退耕 (S3-S4-S5) 中单位面积退耕对水质净化的提升效率明显高于坡耕地退耕相关情景 (S1-S2) (图 4)。但河岸带退耕相关情景 (S3-S4-S5) 中单位面积退耕的水质净化提升效率随着退耕缓冲区范围距离的增加明显减弱 (图 4)。相反, 坡耕地退耕相关情景 (S1-S2) 中单位面积退耕的水质净化提升效率随着退耕坡度的降低略有增加。相同退耕条件下还林情景的单位面积退耕对水质净化的提升效率高于还灌情景, 还草情景的单位面积退耕对水质净化的提升效率最低 (图 4)。与实际情景相比 (S2015), 河岸带缓冲区退耕还林的单位面积退耕的水质净化提升效率均高于实际情景 (S2015), 但还草的单位面积退耕的水质净化提升效率均低于实际情景 (S2015)。坡耕地退耕相关情景的单位面积退耕的水质净化提升率均低于实际情景 (S2015)。

3.3 不同情景的水质净化率及格局变化

与 1980 年水质净化率相比, 模拟的所有退耕情景的平均水质净化率均有不同程度的提升。其中河岸带退耕相关情景的平均水质净化率提升幅度高于坡耕地退耕相关情景 (图 5)。河岸带 300m 缓冲区范围内退耕情景 (S5) 下的平均水质净化率增加最多, 而 25° 以上坡耕地退耕 (S1) 的平均水质净化率增加最少 (图 5)。相同退耕条件下的不同植被恢复对水质净化率的影响不同, 还林情景的水质净化率增加高于还灌和还草情景 (图 5)。

空间上, 与 1980 年相比, 2015 年的流域平均水质净化率增加的区域在上游山区和下游平原都有分布, 而且在上游山区水质净化率增加的区域明显多于下游区域 (图 6)。坡耕地退耕相关情景的水质净化率并没有

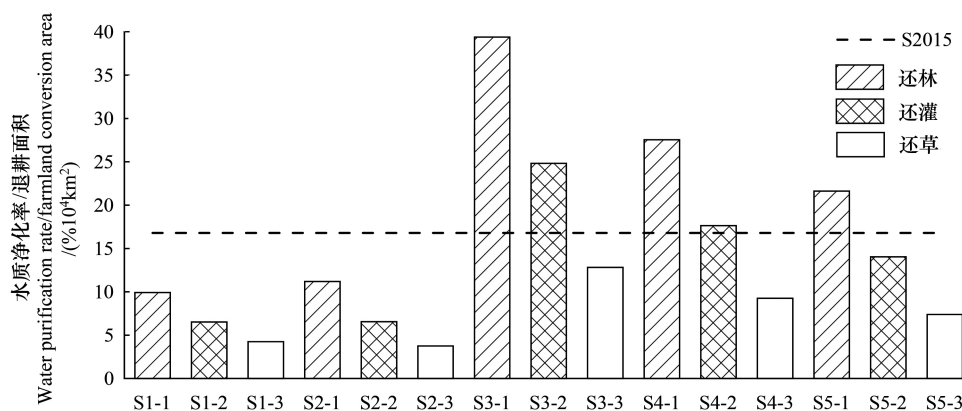


图 4 单位面积农田退耕引起的水质净化率变化

Fig.4 Changes in water purification rate caused by farmland conversion in per unit area

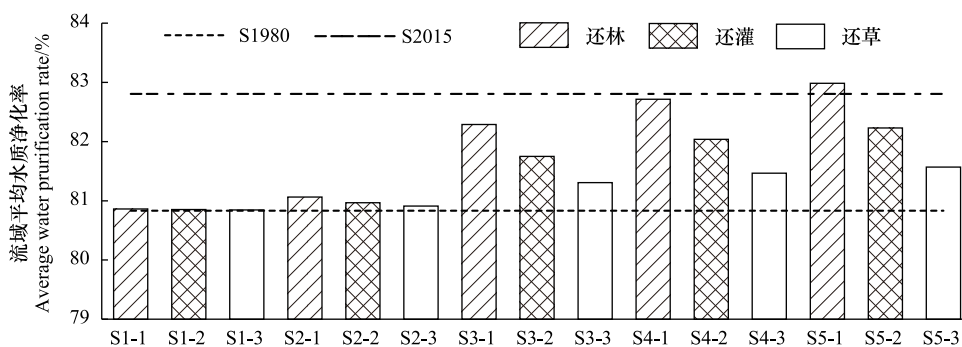


图 5 不同情景下的水质净化率

Fig.5 Water purification rate in different scenarios

呈现出大的变化,而河岸带退耕相关情景则显示在河岸带周边水质净化率呈现出较大的增加,而且这种变化随河岸带退耕范围的增加更加明显(图 6)。此外,在相同退耕规则下,相较于还灌和还草,还林引起了更大面积的水质净化率的提升(图 6)。

4 讨论与结论

4.1 讨论

与 1980 年相比,2015 年白洋淀流域水质净化率明显提升,驱动水质净化能力提升的主要因素是退耕还林还草(表 3)。2015 年新增的森林和灌丛主要由农田转化而来,相较于农田,森林和灌丛的氮输入量大大降低,同时氮持留率明显上升,更有利于减少含氮离子发生位移的可能^[5,16](表 3)。与模拟情景相比,尽管当前退耕策略能较好提高流域整体的水质净化效果,但是以农田面积大幅下降作为代价,就退耕的效率而言并不是最优的选择。

情景模拟结果表明,与坡耕地退耕相比,河岸带退耕对流域的平均水质净化能力提升的贡献更大,单位面积农田退耕的水质净化提升效率也更高。相比坡耕地退耕等其他方案,河岸带是污染物进入水体的最后一道屏障。河岸带退耕能充分利用植被的水质净化能力,阻挡上游汇集而来的营养物质,防止其进入水体,最大程度发挥植被的水质净化能力^[28-29]。尽管随河岸带缓冲距离的延长单位面积农田退耕对水质净化的提升速率在减弱,但是流域平均水质净化率仍呈现出增加趋势(图 4)。这种现象暗示尽管河岸带退耕效率随缓冲距离增加在下降,但仍能促进流域尺度的水质净化服务提升。相同退耕规则下,不同植被恢复类型对水质净化的

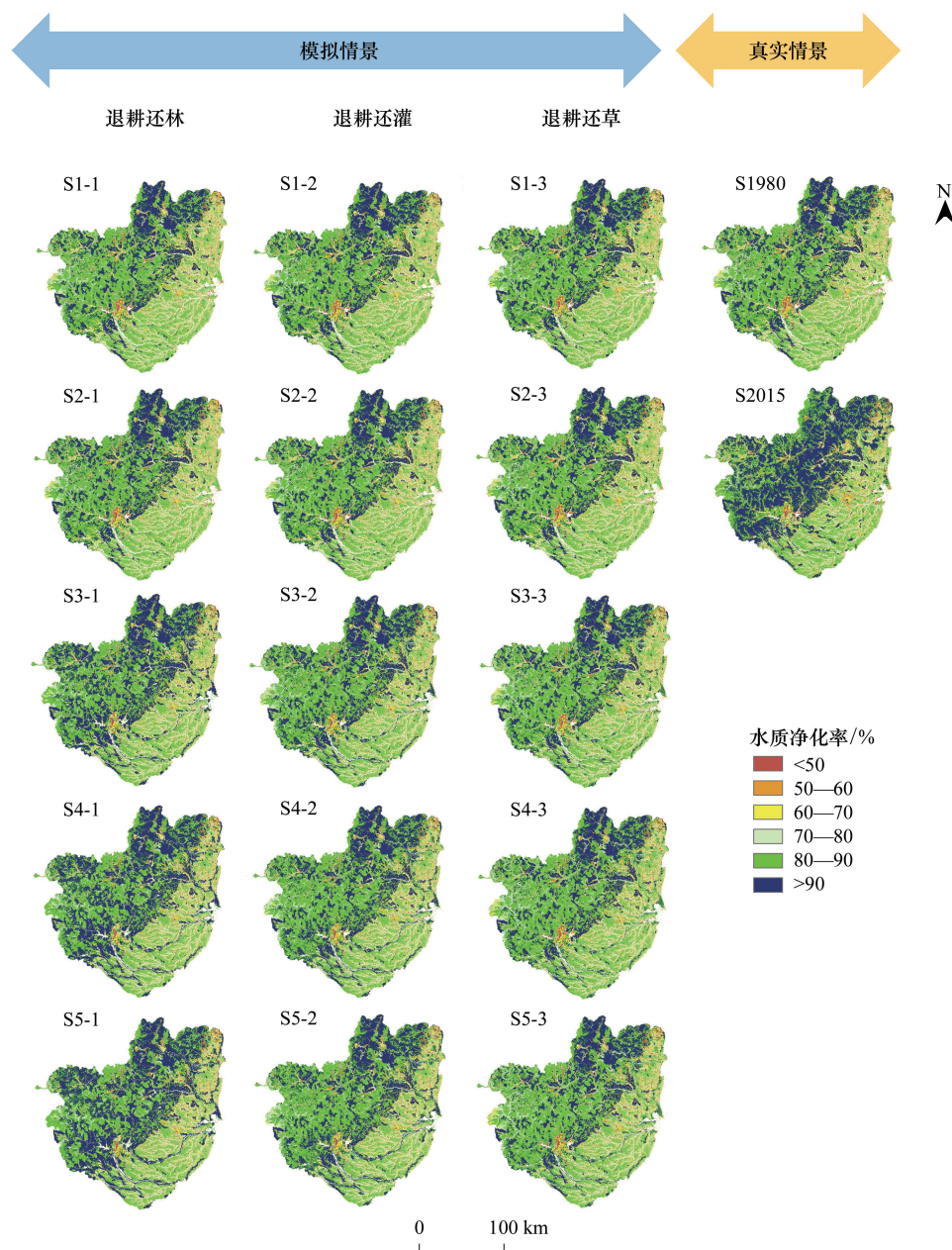


图6 不同情景的水质净化率空间分布

Fig.6 Spatial pattern of water purification rate under different scenarios

提升也存在明显差异,其中还林的导致的流域平均水质净化率增加明显高于还灌,还草(图4),这主要不同植被类型对氮素的吸收以及截留能力的差异有关^[30-31]。总的来看,河岸带300m缓冲区范围退耕还林情景下的流域平均水质净化率高于实际情景(S2015),同时农田面积减少也远低于实际情景(S2015)。相较其他情景,300m河岸带缓冲区范围退耕还林能在提升水质净化能力的同时最大程度减少农田面积的下降。

根据雄安新区发展规划,该区域未来还将持续吸纳100万左右的人口,在远期将承载200万至250万左右的人口^[32]。杨瑞祥等人基于《河北雄安新区规划纲要》分析后发现新区在可预见的未来(-2035年),总需水量将达到9.80亿m³。其中包括3.40亿m³的生活需水量,0.70、0.71和4.99亿m³的工业用水、农业用水和生态用水,供需水之间仍存在较大的缺口^[33]。人口增加对用水需求的提升不仅对水质提出了更高要求,同时也对保障农田面积和保证粮食安全提出了挑战,因此优化退耕策略对于实现上述目标至关重要。此外,河岸

带植被恢复有利于防止“引黄入冀补淀”和“南水北调”等引水工程遭受农业面源污染导致水质等级下降,河岸带自然植被恢复还有利于提高水源涵养能力减少引水下渗而导致的水分运输途中损耗,提高引水效率,缓解可利用水资源供需不足的紧张局面。

4.2 结论

从空间上优化退耕规则是提高水质净化效率是一种重要途径。通过本研究可以发现:(1)就水质净化服务而言,与坡耕地相比,河岸带退耕的水质净化效率更高;(2)河岸带退耕的水质净化单位面积效率随着缓冲区距离的增加而降低,但总体上仍然高于坡耕地退耕;(3)相同退耕规则下,退耕还林的平均水质净化率高于还灌,还草;(4)就白洋淀流域而言,300m 河岸带缓冲区退耕还林情景下的流域平均水质净化率增加高于实际退耕情景(2015 年),同时农田面积减少也远低于实际退耕情景,是一种更好退耕策略。

参考文献 (References):

- [1] Zhang X L, Ren L, Wan L. Assessing the trade-off between shallow groundwater conservation and crop production under limited exploitation in a well-irrigated plain of the Haihe River basin using the SWAT model. *Journal of Hydrology*, 2018, 567: 253-266.
- [2] Wang X J, Zou Z H, Zou H. Water quality evaluation of Haihe River with fuzzy similarity measure methods. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, 25(10): 2041-2046.
- [3] 朱战强,刘黎明,张军连.退耕还林对宁南黄土丘陵区景观格局的影响——以中庄村典型小流域为例. *生态学报*, 2010, 30(1): 146-154.
- [4] 张庆印,樊军,张晓萍.退耕还林(草)对农牧交错区小流域景观格局的影响——以神木县六道沟小流域为例. *中国水土保持科学*, 2013, 11(02): 97-103.
- [5] 刘怡娜,孔令桥,肖焱,郑华.长江流域景观格局与生态系统水质净化服务的关系. *生态学报*. 2019, 39(3): 844-852.
- [6] 徐建英,樊斐斐,刘焱序,陈吉星,魏建瑛.汶川县生态系统服务对景观格局及其变化的响应. *生态学报*, 2020, 40(14): 4724-4736.
- [7] Ferraz S F B, Ferraz K M P M B, Cassiano C C, Brancalion P H S, da Luz D T A, Azevedo T N, Tambosi L R, Metzger J P. How good are tropical forest patches for ecosystem services provisioning?. *Landscape Ecology*, 2014, 29(2): 187-200.
- [8] Yang J, Guan Y, Xia J, Jin C, Li X. Spatiotemporal variation characteristics of green space ecosystem service value at urban fringes: A case study on Ganjingzi District in Dalian, China. *Science of The Total Environment*, 2018, 639: 1453-1461.
- [9] Zhong L N, Wang J, Zhang X, Ying L X. Effects of agricultural land consolidation on ecosystem services: trade-offs and synergies. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 264: 121412.
- [10] Wang W Z, Chen L, Zhu Y X, Wang K, Chen S B, Shen Z Y. Is returning farmland to forest an effective measure to reduce phosphorus delivery across distinct spatial scales?. *Journal of Environmental Management*, 2019, 252: 109663.
- [11] Wang Z J, Jiao J Y, Su Y, Chen Y. The efficiency of large-scale afforestation with fish-scale pits for revegetation and soil erosion control in the steppe zone on the hill-gully Loess Plateau. *CATENA*, 2014, 115: 159-167.
- [12] Wu X, Wang S, Fu B, Feng X, Chen Y. Socio-ecological changes on the Loess Plateau of China after Grain to Green Program. *Science of The Total Environment*, 2019, 678: 565-573.
- [13] Lu Q, Xu B, Liang F, Gao Z, Ning J. Influences of the Grain-for-Green project on grain security in southern China. *Ecological Indicators*, 2013, 34: 616-622.
- [14] Cooper J R, Gilliam J W, Daniels R B, Robarge W P. Riparian areas as filters for agricultural sediment. *Soil Science Society of America Journal*, 1987, 51(2): 416-420.
- [15] Lowrance R, McIntyre S, Lance C. Erosion and deposition in a field/forest system estimated using cesium-137 activity. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1988, 43(2): 195-199.
- [16] 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.
- [17] Zheng H, Li Y F, Robinson B E, Liu G, Ma D C, Wang F C, Lu F, Ouyang Z Y, Daily G C. Using ecosystem service trade-offs to inform water conservation policies and management practices. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2016, 14(10): 527-532.
- [18] 王蕊,王中根,夏军,李璐,陈向东.气候变化及南水北调中线工程对白洋淀流域水文的影响. *水力发电学报*, 2012, 31(2): 14-19.
- [19] 袁瑞强,龙西亭,王鹏,王仕琴,宋献方.白洋淀流域地下水更新速率. *地理科学进展*, 2015, 34(3): 381-388.
- [20] 黄斌斌.海河流域山区 1980-2010 年地表径流变化驱动力研究. 河南理工大学, 2018.
- [21] Redhead J W, May L, Oliver T H, Hamel P, Sharp R, Bullock J M. National scale evaluation of the InVEST nutrient retention model in the United Kingdom. *Science of The Total Environment*, 2018, 610-611: 666-677.
- [22] 邱问心,张勇,俞佳骏,张超,郑超超,余树全. InVEST 模型水源涵养模块实地应用的可行性验证. *浙江农林大学学报*, 2018, 35(05):

810-817.

- [23] 曹文旭, 张志强, 查同刚, 王盛萍, 郭军庭, 许行. 基于 Budyko 假设的潮河流域气候和植被变化对实际蒸散发的影响研究. 生态学报, 2018, 38(16): 5750-5758.
- [24] Sharps K, Masante D, Thomas A, Jackson B, Redhead J, May L, Prosser H, Cosby B, Emmett B, Jones L. Comparing strengths and weaknesses of three ecosystem services modelling tools in a diverse UK river catchment. Science of The Total Environment, 2017, 584-585: 118-130.
- [25] Wong C P, Jiang B, Kinzig A P, Lee K N, Ouyang Z. Linking ecosystem characteristics to final ecosystem services for public policy. Ecology Letters, 2015, 18(1): 108-118.
- [26] Michael F H. Interpolation of rainfall data with thin plate smoothing splines - Part I: tow dimensional smoothing of data with short range correlation. Journal of Geographic Information and Decision Analysis, 1998, 2(2): 139-151.
- [27] 张晓琳, 熊立华, 林琳, 龙海峰. 五种潜在蒸散发公式在汉江流域的应用. 干旱区地理, 2012, 35(02): 229-237.
- [28] Zhao H, Huang Y, You S, Wu Y, Zheng F. A framework for assessing the effects of afforestation and South-to-North Water Transfer on nitrogen and phosphorus uptake by plants in a critical riparian zone. Science of The Total Environment, 2019, 651: 942-952.
- [29] Yan L, Xie C, Xu X, Che S. The influence of revetment types on soil denitrification in the adjacent tidal urban riparian zones. Journal of Hydrology, 2019, 574: 398-407.
- [30] Pham T G, Nguyen H T, Kappas M. Assessment of soil quality indicators under different agricultural land uses and topographic aspects in Central Vietnam. International Soil and Water Conservation Research, 2018, 6(4): 280-288.
- [31] Yang L L, Zhang F S, Mao R Z, Ju X T, Cai X B, Lu Y H. Conversion of Natural Ecosystems to Cropland Increases the Soil Net Nitrogen Mineralization and Nitrification in Tibet. Pedosphere, 2008, 18(6): 699-706.
- [32] 封志明, 杨艳昭, 游珍. 雄安新区的人口与水土资源承载力. 中国科学院院刊, 2017, 32(11): 1216-1223.
- [33] 杨瑞祥, 侯保灯, 鲁帆, 梁川, 赵勇, 肖伟华. 雄安新区水资源承载力分析及提升途径研究. 水利水电技术, 2019, 50(10): 1-9.