

“稻转旱”对低山丘陵区氮素流失通量的影响

——以三峡库区渠溪小流域为例

冉娇娇^{1,2}, 黄平², 陈成龙³, 慈恩⁴, 吕明权²

(1.重庆交通大学, 重庆 400074; 2.中国科学院 重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400714;

3.长江师范学院, 重庆 408100; 4.西南大学 资源环境学院, 重庆 400715)

摘要:为探究“稻转旱”的土地利用变化对区域氮素流失的影响,以三峡库区渠溪小流域为研究对象,利用土地利用转移矩阵揭示了该流域 2001—2019 年的土地利用变化,基于输出系数模型并利用流域氮负荷实测数据进行模型参数修订后,对该流域 2001 年和 2019 年氮负荷进行了估算并比较。结果表明:该流域 2001—2019 年土地利用总体演变趋势为水稻田向旱地转化、旱地向林地转化,且以“稻转旱”为主。这种演变使流域氮素流失增加,2019 年相对于 2001 年氮流失量增加了 26%,平均每公顷氮流失量增加了约 7.8 kg。这种变化表明在农业结构调整时应考虑到水稻田对面源污染物氮素良好的净化拦截作用,控制其面积的缩减以及在小流域氮素输移关键节点上的布局。

关键词:面源污染; 氮流失; 输出系数模型; 三峡库区小流域; 土地利用

中图分类号:X524

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)02-0070-06

Conversion of Rice Paddy into Dry Land and Its Influence on Nitrogen Fluxes in the Low Hilly Area

— A Case Study of the Quxi Basin in the Three Gorges Reservoir Area

RAN Jiaojiao¹², HUANG Ping², CHEN Chenglong³, CI En⁴, LÜ Mingquan²

(1.Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2.Chongqing Institute of Green and

Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China; 3.Changjiang Normal University, Chongqing 408100, China; 4.College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: To explore the effect of the land conversion of rice paddy into dry land on regional nitrogen loss, the land use change from 2001 to 2019 was identified by using the transfer matrix of land use in the Quxi Basin of the Three Gorges reservoir area. The nitrogen loads of the basin from 2001 to 2019 were calculated and compared by the export coefficient model with the parameters modified by the measured nitrogen load data of the basin. The results showed that from 2001 to 2019 the overall shifting trend of land use in the basin was the conversion of rice paddy into dry land and dry land into woodland, and the conversion of rice paddy into dry land was the main trend. This land conversion resulted in 26% increase in nitrogen loss in 2019 compared with that in 2001, with an average increase of about 7.8 kg/hm². The results indicate that, in facing the rapid agricultural land-use change, the significant role of paddy field in purifying and intercepting non-point source nitrogen should be taken into account, paddy field area of given size shall be maintained, and paddy field shall be designed at some key nodes of nitrogen transport in the small watershed agricultural landscape. These results can provide a new insight of a regional control of non-point source pollution in coping with the environmental changes.

Keywords: non-point source pollution; nitrogen loss; export coefficient model; small watershed of Three Gorges reservoir area; land use

收稿日期:2021-02-25

修回日期:2021-04-07

资助项目:国家科技支撑计划课题(2018YFD0800606);国家自然科学基金(42071242)

第一作者:冉娇娇(1997—),女,重庆万州人,硕士研究生,研究方向为面源污染。E-mail:1270025793@qq.com

通信作者:吕明权(1987—),男,四川自贡人,博士,主要从事水体景观地理学研究。E-mail:lvmingquan@cigit.ac.cn

以氮、磷为主的养分污染导致人类活动密集区的淡水环境普遍恶化。随着点源污染逐渐得到控制,面源污染排放所占比重大致增加,其中氮元素的排放尤为突出^[1]。氮素最大的排放源来自农业生产活动,其氮排放量占总排放量近 70%^[2],其中以种植业产生的氮排放占比最大。随着近年来社会经济要素的变化,种植结构发生了巨大的变化,农地利用类型也随之改变^[3]。探讨农地利用类型改变造成氮素流失的影响对科学制定区域农业面源污染防治措施具有重要意义。

三峡库区是三峡水库水质保护的第一道屏障,库区面源污染排放负荷直接影响着三峡水库的水质安全。近年来,随着农村经济社会结构的变化,农村劳动力减少,库区呈现水稻转向旱地作物种植(“稻转旱”)的趋势,在 2000—2010 年期间,三峡库区土地利用变化的主要特征是水稻田逐渐减少而旱地大幅增加^[4]。据《重庆统计年鉴》显示,2010—2018 年期间水稻田面积呈继续减少趋势,而相应的旱地呈增加趋势。这种变化趋势对于农业面源污染排放负荷的影响还不得而知,其对水质的影响一直没有引起足够重视。

近年来,土地利用方式变化对面源负荷的影响逐渐被关注,已取得较多的研究结果。耿润哲等^[5]基于 SWAT 模型对密云水库流域面源负荷空间分布进行评价,结果显示流域面源污染负荷与土地利用格局存在密切联系。耕地和建设用地面积往往与流域污染负荷呈正相关^[6],而林地有助于流域营养物的控制^[7],城镇化的快速推进使流域面源污染风险区急速扩张^[8],而退耕还林则能够有效控制土壤养分流失^[9]。刘瑞民等^[10]利用输出系数模型计算了长江上游土地利用/覆盖变化对非点源污染影响;孙丽娜等^[11]将 SWAT 模型和 CLUE-S 模型结合,模拟了东辽流域未来 20 a 土地利用变化的不同情景以及不同情境下的面源污染负荷。然而,这些研究多关注整体耕地变化,对于耕地内部种植类型转变对面源污染负荷影响研究较少。

本文选择渠溪小流域为对象,该流域位于三峡库区中部,是库区农业生产活动的集中区,紧邻三峡水库,是库区典型农业小流域。选择 2001—2019 年研究时段,该时段处于农村劳动力快速转移和经济社会结构剧烈变化时期,也是“稻转旱”变化的主要时期。本研究利用历史高清遥感影像和无人机航拍影像,探究该流域土地利用方式的变化特征,在流域氮素排放负荷实测数据的基础上建立面源污染输出模型估算该流域 2001 年和 2019 年流域氮素输出负荷,揭示“稻转旱”对氮素输出的影响,以期对三峡库区农业土地利用结构调整及面源污染控制提供科学参考。

1 研究区域及数据来源

1.1 研究区概况

渠溪小流域位于重庆市涪陵区珍溪镇,地处三峡库区腹部地带,居长江北岸,位于东经 107°30′10″—107°30′55″,北纬 29°53′54″—29°54′32″。该区域为长江一级支流,具有典型的三峡库区地貌特征,以低山、丘陵为主,海拔在 186~317 m,分布最广的土壤类型为紫色土。该流域属于亚热带湿润季风气候,四季降雨分配不均,主要集中在 4—10 月,多年平均降雨量 1 101.0 mm。流域总面积约 87.99 hm²,被自然地形分割成 A、B 两个树状结构的子流域。流域内土地利用以农业耕地为主,包括旱地、水田、林地和池塘,土地垦殖率高,主要农作物为水稻、玉米以及榨菜。同一农作物施肥量基本相同,春季旱地种植玉米,水田种植水稻。玉米纯氮施用量约为 250 kg/hm²(玉米复合肥, N : P₂O₅ : K₂O = 11 : 9 : 5),水稻施肥量为 120 kg/hm²(水稻复合肥, N : P₂O₅ : K₂O = 13 : 6 : 6)。秋季旱地和水田轮种榨菜,总氮施肥量约为 400 kg/hm²(榨菜复合肥, N : P₂O₅ : K₂O = 12 : 6 : 7)。玉米施肥采用埋施的方式,水稻和榨菜施肥均采用撒施的方式。流域分布有自然村落,2015 年调查显示共有人口 44 户,常住人口 106 人。

1.2 数据来源

本研究使用的数据集主要包括渠溪小流域 2001 年和 2019 年的遥感影像,社会经济调查数据及渠溪小流域两个集水子流域出口的径流量与水体总氮浓度数据。2001 年的遥感影像从 Google earth 中下载,其分辨率为 2 m,2019 年 7 月的遥感影像通过无人机航拍获取,分辨率为 0.3 m。利用 ArcGIS 软件采用目视解译的方法对研究区进行土地利用分类,分为旱地、水田、林地、池塘和其他用地 5 种用地类型,获得研究区 2001 年和 2019 年的土地利用图和土地利用数据。流域的氮素流失量由分别在渠溪小流域 A 和 B 子流域出口监测的径流量和水体总氮浓度数据计算而得,基于已有监测数据,获得了 2012 年、2013 年、2015 年 A 和 B 子流域的氮素流失量。社会经济调查数据包括各土地利用的施肥量、人口和禽畜养殖等,来源于该流域其他的相关研究^[12]。

2 研究方法

2.1 输出系数模型

本文采用经典的 Johnes 输出系数模型^[13]模拟研究区的面源污染物氮素负荷。计算方法如下:

$$L = \sum_{i=1}^n E_i \times A_i \times I_i + P \text{ 或 } L = \sum_{i=1}^n E_i \times A_i + P$$

式中: L 为营养物的总流失量(kg/a); E_i 为第 i 类营养源的输出系数[kg/(hm²·a)或 kg/(kg·a)]; A_i 为第 i 类土地利用类型的面积(hm²)或人口数量(人)或第 i 类牲畜的数量(个); I_i 为第 i 种营养物的输入量(kg/a); P 为降雨输入的营养物数量(kg/a)。

$$P = d \times a \times \lambda$$

式中: d 为研究区域单位面积氮沉降率[kg/(hm²·a)]; a 为研究区域的总面积(hm²); λ 为径流系数。

2.2 输出系数模型参数的确定

常用的面源污染估算模型有输出系数模型、SWAT 模型和 AGNPS 模型等。输出系数模型是主要考虑土地利用类型来定量核算面源污染的方法,具有参数少、操作简单的优点,且具有一定的精度。而 SWAT 模型和 AGNPS 模型等虽对面源有较好的模拟效果,但存在参数较多,很多参数不易获取的问题^[14]。由于对研究区的水文水质监测资料有限,输出系数模型更适用于本研究。本文根据陈成龙^[12]对该流域研究中施肥的总氮收入与径流总氮输出的比值确定了玉米旱地、榨菜旱地和水田的输出系数,其他用地类型的输出系数参考三峡库区类似研究文献^[15-16]的数值,以期提高模型模拟效果。最终确定的不同土地利用类型的输出系数数值见表 1。

禽畜养殖和农村生活部分的面源污染的输出系

表 3 流域氮负荷模型估算值与实测值误差

年份	实测值/kg	小流域		子流域 A		子流域 B		
		估算值/kg	误差/%	实测值/kg	估算值/kg	误差/%	实测值/kg	估算值/kg
2010	3985	3246	−18.54	1537	1981	28.89	2448	1246
2012	3350	3266	−2.51	1600	1807	12.94	1750	1460
2015	3453	3325	−3.71	1653	1714	3.69	1800	1610

3 结果与分析

3.1 土地利用变化特征

渠溪小流域土地利用以耕地为主,旱地和水田面积占到了流域总面积的 83%(2019 年)。2001—2019 年土地利用变化主要集中在旱地、水稻田和林地 3 类用地(表 4)。总体耕地面积有一定减少,但种植面积增加,因为 2001 年流域内只有 75%水田在收获水稻

表 4 2001—2019 年渠溪小流域土地利用情况

年份	玉米旱地	水田	榨菜旱地	林地	池塘	其他	流域合计
2001	45.36	33.21	55.32	6.51	0.28	2.63	87.99
2019	66.85	6.31	73.16	11.60	0.20	3.03	87.99

对比小流域内两个子流域 A、B 的土地利用变化可以发现(图 1),2019 年子流域 A 水田保留面积大于子流域 B,在子流域 A 的水渠周围分布着较为连

数参考杨彦兰等^[16]的研究,采用国家环保局推荐的禽畜排泄系数的 10%和人口输出系数。人口的面源污染输出主要为农村生活污水及废弃物,其输出系数为每人 1.58 kg/a,禽畜养殖的输出系数见表 2。

降雨氮负荷计算中的单位面积氮沉降率参照侯思宇等^[17]的研究,取值 24.48 kg/(hm²·a)。径流系数根据研究区 2012 年降雨量与径流量数据计算得到,为 0.18。

表 1 修订后不同土地利用类型的总氮输出系数

项目	水田	榨菜旱地	玉米旱地	林地	池塘
施肥量/(kg·hm ^{−2})	120	400	250		
输出系数	0.06	0.03	0.1	2.5	11

注:输出系数单位为 kg/(kg·a)或 kg/(hm²·a)。

表 2 禽畜养殖业总氮输出系数

禽畜名称	猪	牛	羊	家禽
输出系数	0.45	6.11	0.23	0.028

2.3 输出系数模型的检验

利用 2010 年、2013 年和 2015 年的土地利用数据及流域出口氮负荷数据对模型模拟结果进行验证。考虑到地形、水渠自净能力等影响因素,模型模拟结果与实际监测结果有一定误差(表 3)。误差计算结果显示小流域整体氮素流失负荷的模型估算结果与实际观测结果误差均小于 20%,这表明利用实测数据修正参数的输出系数模型应用于该流域有着较好的模拟效果^[18]。

后会种植榨菜,而 2019 年水稻收获后水田和旱地全部种植了榨菜。由表 5 可知,2001—2019 年水田面积大幅度收缩,2019 年相对于 2001 年减少了近 81%,减少的水田中近 80%转为旱地,以致旱地面积显著增加,2019 年比 2001 年增加了 47%(按玉米旱地计算)。受生态退耕的影响,流域内林地面积增加,2019 年比 2001 年扩大近 2 倍,其中大部分由旱地转入,但林地分布依然很少,林地面积只占到了总面积的 13%。

续的水田,且在流域出口有大量分布。而本来水田面积占比较大的子流域 B 保留的水田数量很少,只有水渠两侧分布着小面积的零散水田。两个子流域都

将海拔较高区域的耕地进行了退耕还林,特别是子流域 A 的林地扩张明显。总体上,渠溪小流域土地利

用发生了较大改变,“退耕还林”政策得到了较好的实施,耕地面积有一定收缩,且逐渐向旱地种植转变。

表 5 2001—2019 年渠溪小流域土地利用类型转移矩阵 hm²

年份	土地利用类型	2019 年					
		池塘	旱地	其他	林地	水田	合计
2001 年	池塘	0.08	0.07	0.00	0.02	0.03	0.20
	旱地	0.18	36.60	0.93	2.64	26.50	66.85
	其他	0.02	0.97	1.28	0.00	0.76	3.03
	林地	0.00	7.10	0.42	3.82	0.26	11.60
	水田	0.00	0.62	0.00	0.03	5.66	6.31
	合计	0.28	45.36	2.63	6.51	33.21	87.99

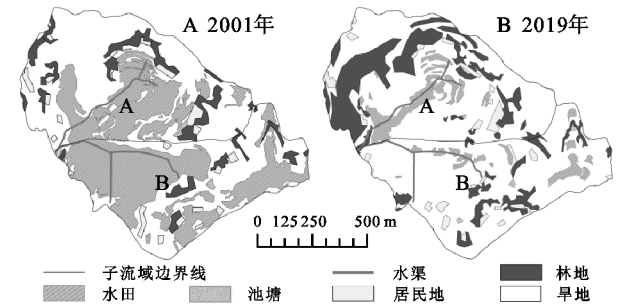


图 1 2001 年和 2019 年渠溪小流域土地利用状况

3.2 流域氮负荷变化

利用校正的输出系数构建的模型对渠溪小流域 TN 的输出负荷量进行估算。结果显示,2001 年和 2019 年渠溪小流域氮输出量分别为 2 549.94,3 237.53 kg,2019 年相对于 2001 年氮输出量增加了 26%。其中水稻田改为旱地使氮排放增加了 848.92 kg,而退耕还林

后(除去林地开垦)减少了 254.55 kg 的氮排放,最终导致流域内氮负荷增加了 687.59 kg,说明“稻转旱”会使流域面源负荷大幅增加,而退耕还林的实施起到了一定的缓解作用。

该地区 2001 年不同污染源输出的氮负荷量对流域氮负荷量及贡献率(图 2)大小依次递减为:旱地—榨菜、旱地—玉米、水田、农村生活污水及废弃物、畜禽养殖、居民地、林地。由于 2001—2019 年期间大部分水田改为旱地耕作,水田产生总氮的贡献率由原来的 9.14%减小到 1.40%,而两类旱地对总氮排放的贡献率则由 66.30%增加到 78.74%。其中玉米旱地的氮负荷量增幅最大,2019 年相对于 2001 年氮排放增加了 627.97 kg。2019 年玉米旱地氮排放量最高,对总氮排放的贡献率位于第一,榨菜旱地位于第二,生活污水与畜禽养殖、水田次之,林地最小。

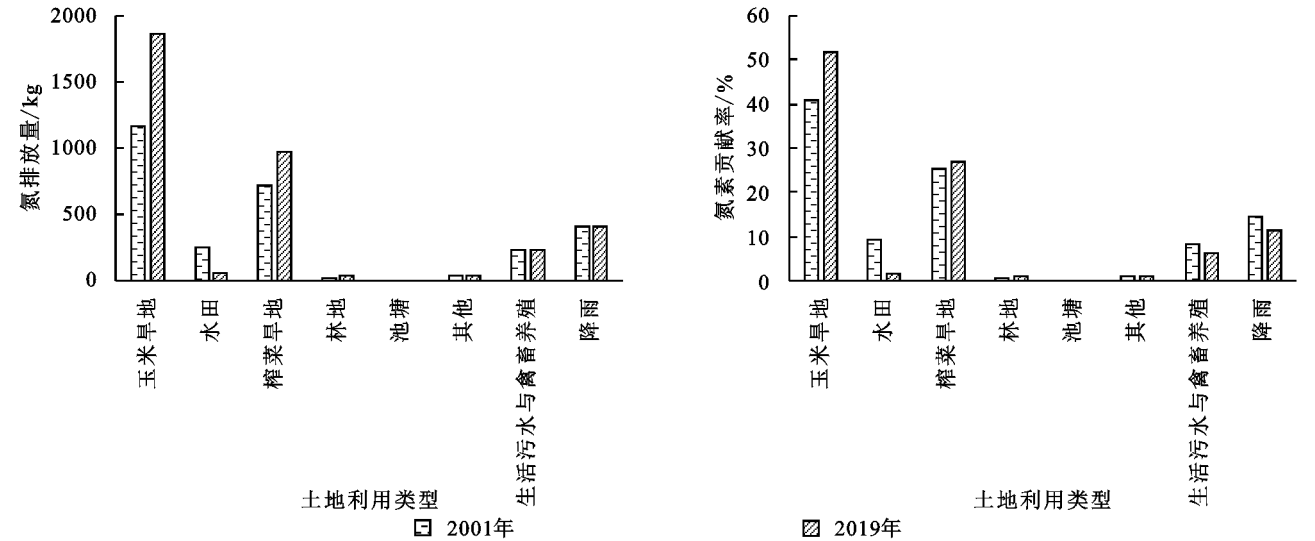


图 2 2001 年和 2019 年渠溪小流域各用地类型氮素排放量与贡献率

4 讨论

4.1 “稻转旱”趋势与驱动因素

本研究利用高清遥感影像分析了三峡库区典型小流域的土地利用转移格局,2001—2019 年,水稻田减少了 80%,其中大部分转化为旱耕地。本研究结

果与邓华等^[19]对利用 CLUE-S 模型对三峡库区土地利用变化模拟结果中“稻转旱”的普遍发生现象一致。黄玛兰等^[20]对中国不同省份种植结构变化发现,与 1981 年相比,2015 年水稻种植面积比例增长区域主要集中在东北地区,而南方除湖北、湖南外,其他省份均处于下降趋势。在全国尺度上,据农业部固定观察

点统计 2003—2012 年全国农户粮食种植结构发现水稻种植比例由 26.9% 下降到 18.6%，而旱地作物玉米由 22.7% 上升到 30.7%^[21]。“稻转旱”这一种植结构的变化与不同种植业的特点及农村经济社会要素的变化相关。水稻相比旱地作物耗工费时、劳动投工多，随着农村劳动力的转移和留守劳动力的老龄化促使“水稻转旱”的发生^[22]。虽然随着技术的进步，农村劳动力的转移可通过机械化替代，但是丘陵地区和山区地形因素阻碍了机械的使用，使水稻种植面积萎缩^[20]。在多种因素的共同作用下，水稻田改为旱地已成为普遍趋势。

4.2 “稻转旱”后流域负荷增加的机制

利用本流域的氮流失观测数据校正输出系数模型，得到了 2001 年及 2019 年的氮素排放负荷，2019 年较 2001 年氮排放增加 26%。在土地利用转移矩阵中，最大的两类转移类型是“稻转旱”和“旱转林”，“旱转林”使面源污染排放减少，而“稻转旱”使排放增加。“稻转旱”使流域排放负荷增加主要通过以下机制实现。首先，“稻转旱”使化肥输入量增加。本研究发现水稻田的化肥用量远小于旱地作物的化肥用量，水稻化肥使用 120 kg/hm²，旱地化肥使用 650 kg/hm²（玉米和榨菜总计），“稻转旱”使流域总的氮肥施用量增加。其他研究者也发现了水旱作物的化肥使用量的巨大差异，任世鑫等^[23]对我国三大粮食作物化肥施用情况的研究发现我国玉米和小麦等旱地作物普遍存在施肥过量的问题，而水稻施用过量的范围较小，且玉米和小麦施肥量普遍高于水稻，因此施肥量的增加是“稻转旱”后氮排放增加的重要原因。

其次，除了水稻田氮肥施用更少外，水稻田相比旱地增加了氮素的拦截能力。由于特殊的结构使水稻田具有氮素储存和拦截能力，水稻和稻田土壤对氮素有吸收和固定作用，可有效减少农田排水中氮磷的流失^[24]。张刚等^[25]在太湖地区利用不施肥的水稻田作为缓冲区，发现稻季的缓冲带对径流氮素损失具有明显的拦截效果。本研究中大部水稻田位于旱耕地下游，在上游冲刷旱地而携带大量氮素的径流将在下游汇入水稻田中得到拦截和储存，超出稻田储存量后才会溢出，其拦截效果更为突出。水稻田改为旱地后，对径流的拦截能力下降，导致了流域氮排放增加。

另外，水稻田作为一种人工湿地为氮素转化和去除提供了一个重要场所。淹水环境使水稻田土壤处于缺氧和厌氧环境，有利于硝化菌和反硝化菌的生长，使稻田微生物的硝化和反硝化作用增强，有助于氮素的去除^[26]。Onishi 等^[27]对水稻田氮收支进行计算发现通过反硝化作用能够去除约氮素总输入量

10% 的氮，还有研究表明水稻田中反硝化过程能够去除进水氮量 40.9% 的氮素^[28]。流域大面积的“稻转旱”后，氮素转化场所减少，反硝化去除作用减弱，流域氮负荷增加。

4.3 稻田分布格局对子流域 A、B 氮负荷的影响

研究区被天然地形分割为两个子流域 A、B，子流域 A 的面积比子流域 B 高出 34%，且子流域 A 的旱地总种植面积（包括复种）比子流域 B 要大，但监测数据显示子流域 A 的氮负荷比子流域 B 少。一方面可能是因为子流域 A 稻田分布集中度高于子流域 B，稻田的净化系统更加完善，对污染物的消纳能力更强；另一方面是因为子流域 A 的稻田集中分布距离流域出口较近的位置，Basnyat 等^[29]指出作为“汇”的景观距离上越靠近流域出口，其对污染物的拦截净化作用就越显著，因此子流域 A 的稻田作为“汇”的功能要强于子流域 B。总的来说，稻田的空间分布格局差异导致了子流域 A 的氮负荷低于子流域 B，同时也从侧面反映出水稻田在污染物消纳的强大能力，这与陈成龙^[12]探究稻田格局对流域氮磷排放的影响的研究结果具有一致性。在保护水稻田的同时，也应注意其在流域出口等关键节点的布设，充分发挥其消纳面源污染物的功能，促进资源循环利用。

4.4 不足与展望

本文计算流域 2001 年氮输出负荷时，各土地利用的施肥量是以 2019 年的施肥量为依据，而根据相关研究表明^[30]，以前的施肥量远小于现在的施肥量，因此 2001 年的氮输出实际通量小于本研究中计算的值。由于本流域 2001 年的实际施肥量很难获取，另外，本研究重点关注的是土地利用变化引起的氮素通量变化，因此利用 2019 年的施肥量不会影响本研究的结论。输出系数模型基于土地利用类型估算面源污染负荷，并不能反映景观分布格局对污染物迁移转化的影响，因此对子流域氮负荷的模拟结果与实际监测结果相反，显示子流域 A 的氮负荷高于子流域 B。后续将通过长期监测数据，加入土地利用斑块离散度因子对模型进行改进，更准确地反映土地利用格局对氮流失通量的影响。而稻田改为旱地后，水稻土的性质将会如何改变，以及对种植旱地作物的影响有待后续研究。

5 结论

（1）2001—2019 年研究流域土地利用变化的主要特征是：水稻田向旱地转化，旱地向林地转化，且以“稻转旱”为主，旱地和林地面积显著增加，水稻田面积显著减少。

(2) 2001—2019年的“稻转旱”变化使氮素通量增加33.3%,其他土地利用变化如“退耕还林”抵消氮素增加的部分趋势,使整个流域氮输出负荷相比2001年增加了26%。

(3) 水稻田作为人工湿地生态系统对减少流域氮素流失有着积极作用,有利于面源污染的防控,在农村农业种植业结构调整时应当考虑区域径流关键节点的水稻田布设,充分发挥稻田系统的面源污染物消纳与资源循环利用功能。

参考文献:

- [1] Yu C, Huang X, Chen H, et al. Managing nitrogen to restore water quality in China [J]. *Nature*, 2019, 567(7749):516-520.
- [2] 王军霞,李莉娜,陈敏敏,等.中国重点污染源总磷、总氮排放状况研究[J].*环境污染与防治*, 2015, 37(10):98-103,110.
- [3] 刘珍环,杨鹏,吴文斌,等.近30年中国农作物种植结构时空变化分析[J].*地理学报*, 2016, 71(5):840-851.
- [4] 许其功,刘鸿亮,席北斗,等.三峡库区土地利用与景观格局变化研究[J].*环境科学与技术*, 2007, 30(12):83-86,122.
- [5] 耿润哲,李明涛,王晓燕,等.基于SWAT模型的流域土地利用格局变化对面源污染的影响[J].*农业工程学报*, 2015, 31(16):241-250.
- [6] 吴东,黄志霖,肖文发,等.三峡库区小流域土地利用结构变化及其氮素输出控制效应:以兰陵溪小流域为例[J].*环境科学*, 2016, 37(8):2940-2946.
- [7] Brett M T, Arhonditsis G B, Mueller S E, et al. Non-point-source impacts on stream nutrient concentrations along a forest to urban gradient [J]. *Environmental Management*, 2005, 35(3):330-342.
- [8] 聂启阳,吕继强,孙夏利,等.土地利用变化影响的濡河流域潜在非点源污染风险时空变化特征[J].*水资源与水工程学报*, 2019, 30(5):80-88.
- [9] 吴东,黄志霖,肖文发,等.三峡库区典型退耕还林模式土壤养分流失控制[J].*环境科学*, 2015, 36(10):3825-3831.
- [10] 刘瑞民,杨志峰,丁晓雯,等.土地利用/覆盖变化对长江上游非点源污染影响研究[J].*环境科学*, 2006, 27(12):2407-2414.
- [11] 孙丽娜,卢文喜,杨青春,等.东辽河流域土地利用变化对非点源污染的影响研究[J].*中国环境科学*, 2013, 33(8):1459-1467.
- [12] 陈成龙.三峡库区小流域氮磷流失规律与模型模拟研究[D].重庆:西南大学,2017.
- [13] Johnes P J. Evaluation and management of the impact of land use change on the Nitrogen and phosphorus delivered to surface Waters; the export coefficient modeling approach[J]. *Journal of Hydrology*, 1996, 183(3/4):323-349.
- [14] 于维坤,尹炜,叶闽,等.面源污染模型研究进展[J].*人民长江*, 2008, 39(23):83-87.
- [15] 蔡明,李怀恩,庄咏涛,等.改进的输出系数法在流域非点源污染负荷估算中的应用[J].*水利学报*, 2004(7):1-8.
- [16] 杨彦兰,申丽娟,谢德体,等.基于输出系数模型的三峡库区(重庆段)农业面源污染负荷估算[J].*西南大学学报:自然科学版*, 2015, 37(3):112-119.
- [17] 侯思宇,于兴娜,龚克坚,等.重庆市大气降水污染及其沉降特征[J].*中国环境科学*, 2019, 39(10):4100-4107.
- [18] 李兆富,杨桂山,李恒鹏.基于改进输出系数模型的流域营养盐输出估算[J].*环境科学*, 2009, 30(3):668-672.
- [19] 邓华,邵景安,王金亮,等.多因素耦合下三峡库区土地利用未来情景模拟[J].*地理学报*, 2016, 71(11):1979-1997.
- [20] 黄玛兰,李晓云.农业劳动力价格上涨对农作物种植结构变化的省际差异性影响[J].*经济地理*, 2019, 39(6):172-182.
- [21] 钱龙,袁航,刘景景,等.农地流转影响粮食种植结构分析[J].*农业技术经济*, 2018, 37(8):63-74.
- [22] 王善高,田旭.农村劳动力老龄化对农业生产的影响研究:基于耕地地形的实证分析[J].*农业技术经济*, 2018, 37(4):15-26.
- [23] 任世鑫,李二玲,邓晴晴,等.中国三大粮食作物化肥施用特征及环境风险评价[J].*长江流域资源与环境*, 2019, 28(12):2936-2947.
- [24] 郭海瑞,赵立纯,窦超银.稻田人工湿地氮磷去除机制及其研究进展[J].*江苏农业科学*, 2018, 46(6):23-26.
- [25] 张刚,王德建,陈效民.太湖地区稻田缓冲带在减少养分流失中的作用[J].*土壤学报*, 2007, 44(5):873-877.
- [26] 张太平,陈韦丽.人工湿地生态系统提高氮磷去除率的研究进展[J].*生态环境*, 2005, 14(4):580-584.
- [27] Onishi T, Nakamura K, Horino H, et al. Evaluation of the denitrification rate of terraced paddy fields[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 436:111-119.
- [28] Hamersley M R, Howes B L, White D S, et al. Nitrogen balance and cycling in an ecologically engineered septage treatment system[J]. *Ecological Engineering*, 2001, 18(1):61-75.
- [29] Basnyat P, Teeter L D, Flynn K M, et al. Relationships between landscape characteristics and nonpoint source pollution inputs to coastal estuaries[J]. *Environmental Management*, 1999, 23(4):539-549.
- [30] 祝宏辉,王彦.我国农业化肥施用强度的变动趋势与影响因素:基于省级面板数据的实证分析[J].*江苏农业科学*, 2018, 46(13):353-358.