

亚热带中尺度流域氮磷输出的长期变化规律与影响因素^①

任盛明^{1,2,3}, 曹龙熹¹, 孙 波^{1*}

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049; 3 江西省山江湖开发治理委员会办公室, 南昌 330046)

摘 要: 选择中亚热带红壤丘陵区赣江上游的湓水河流域(579 km²), 基于长期监测和 SWAT 模型反演研究了流域尺度养分输出的长期变化规律, 采用集成推进树(ABT)和部分典范对应分析(PCCA)方法揭示了流域尺度养分输出的影响因素。2003—2009 年的监测结果表明: 湓水河流域氮磷输出量年际差异显著, 流域年均总氮和总磷输出量分别为 1.10 t/(km²·a)和 0.12 t/(km²·a)。SWAT 模型反演分析显示, 长期大规模的水土流失治理显著减少了流域氮磷流失, 1983—1990 年年均总氮和总磷输出量比治理前分别下降了 43.8% 和 51.0%, 1993—2002 年则比前一阶段分别下降了 28.3% 和 27.2%。总体上, 人为因素对流域养分输出量长期变化(1978—2009)的影响高于气候因素, 人为因素对 31 年间流域总氮和总磷年输出量变化总的贡献率分别为 48.7% 和 38.9%, 气候因素总贡献率分别为 23.2% 和 22.8%。人为因素中人口是主要的影响因素, 其他重要的影响因素包括氮肥施用量、疏林地面积、土地利用程度和植被指数。研究区需要在控制流域人口密度和合理施肥基础上, 通过流域治理措施合理调整流域土地利用, 以实现流域氮磷输出的控制。

关键词: 亚热带; 中尺度流域; 氮磷输出; 影响因子; 集成推进树; 部分典范对应分析

中图分类号: N03

土壤和农田系统中的农用化合物(氮、磷养分和农药)在雨滴打击和径流冲刷下, 会随地表、地下径流迁移并随之汇入河流、湖泊、水库等水体, 引起水体的污染或富营养化。我国东南部红壤丘陵区经济相对发达, 由于耕地面积急剧减少, 农用化学品的过量投入和不合理使用, 加之水产和畜禽养殖业的迅速发展, 导致农业非点源污染日益严重^[1]。2002 年我国东南红壤丘陵区水土输出面积为 13.1 万 km², 占土地面积(113.9 万 km²)的 11.5%。水利部综合科考表明, 2005 年东南红壤区约有 58 万 t 氮肥和 11 万 t 磷肥通过径流输出进入水体^[2]。养分输出导致土壤退化和水体环境风险, 而径流中的氮和磷是其中起关键作用的负荷元素^[3]。因此, 在流域尺度上研究农田生态系统中氮、磷的输出过程, 成为农业养分管理和面源污染控制的核心内容^[1]。

在农田氮磷输出方面, 我国开展了不同尺度的氮磷输出通量的估算。流域尺度上的研究表明, 我国 3 个主要河流流域的氮素迁移损失十分严重^[4-5]。Ti 和 Yan^[6]估算 1980—2010 年期间, 长江、黄河和珠江每

年氮输出量分别增加了 1.34、1.08 和 1.95 倍, 达到 1244、223 和 1219 kg/(km²·a)。控制区域尺度养分输出的因素涉及降雨、施肥、地形、植被、土壤和耕作管理。研究表明我国河流水系中 NO₃-N 含量与年降雨量、人口密度、氮肥用量、牲畜饲养量和作物播种面积相关^[7]。在红壤丘陵区小流域尺度的研究表明, 流域水稻种植面积显著影响了氮磷养分输出量^[8]。由于缺乏长期的定位监测, 目前对流域尺度氮磷输出机制及其对水体富营养的贡献仍不清楚。一些研究者通过修正非点源污染模型(如 SWAT 模型)对我国南方红壤丘陵区进行了流域尺度的养分输出研究^[9-10]。

我国南方红壤丘陵区高温多雨、地形复杂、土地利用方式多样, 不同的自然和人为因素之间相互作用共同影响流域的养分输出。从 20 世纪 80 年代起, 针对红壤丘陵区的水土输出问题, 我国各级政府在流域尺度上开展了恢复植被、修建梯田等水土保持工作。在这期间, 许多学者对这些水土输出治理工作的效益以及其带来的水文效应进行了研究。20 世纪 90 年代以来, 随着水文及养分迁移模型的不断成熟, 人们关

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(2011CB100506)、国家自然科学基金项目(40971163)、国家科技支撑计划项目(2011BAD31B04-2)和科技基础性工作专项(2012FY111800)资助。

* 通讯作者(bsun@issas.ac.cn)

作者简介: 任盛明(1976—), 男, 江西龙南人, 博士研究生, 主要从事水土流失和农田养分循环模拟研究。E-mail: smren@issas.ac.cn

注的重点逐渐集中在流域水沙及养分迁移模型本身的开发以及其适应性验证上,对从流域尺度定量化研究各种自然和人为因素对流域养分输出的长期影响报道则较少。为此,本文选择南方红壤丘陵区典型流域——湄水河流域作为研究区,通过开展流域氮磷养分输出的长期监测(2003—2009),结合分布式流域水文模型(SWAT)反演,明确流域氮磷养分输出的长期变化规律;通过收集流域长期监测和调查数据,采用数量生态学统计方法(集成推进树算法ABT和部分典范对应分析PCCA方法),综合分析气候、植被、水文、土地利用变化等自然和人为因素对流域氮磷输出的定量影响。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

江西省兴国县湄水河流域是我国南方红壤丘陵区赣江流域的源头区,流域总面积为 579 km^2 ,地理位置 $115^{\circ}30'—115^{\circ}52'E$, $26^{\circ}19'—26^{\circ}37'N$,处于亚热带季风区,雨量丰沛,但分布不均,受台风影响严重,极端天气频繁。流域内工业活动较少,是一个较为封闭的以农业生产为主的流域。2008年,流域中7个乡镇的人口总数为144 621人。湄水河流域的主要作物为双季稻,根据2005年的遥感影像解译,流域中水田面积占流域土地总面积的16.2%,占耕地面积的85.0%。湄水河流域曾是我国水土输出最为严重的区域之一,1983年起开展了以植被恢复为主的水土输出治理工作,经过治理的流域面积占土地总面积的26%,治理后流域森林覆盖率由1975年的43.8%上升到2005年的76.0%。

1.2 监测方法和数据收集

流域养分输出监测按照水环境要素观测与分析方法^[11],在湄水河流域出口东村水文站开展了2003—2009年径流和泥沙的采样。采样从2003年10月开始,采样密度为1~2次/周。土壤和水样在鹰潭红壤生态实验站分析,分析项目包括水样中的全氮、硝态氮、氨态氮、全磷、可溶性矿物磷和有机磷含量,以及泥沙中的有机氮、有机磷、矿物磷含量。累计计算逐月和逐年氮磷输出量。

基于2003—2009年径流和泥沙中的养分数据,验证美国农业部农业研究所(USDA-ARS)开发的SWAT(soil and water assessment tools)模型^[9];在此基础上结合流域气象、植被、土壤和土地利用数据,反演1978—2009年流域尺度氮、磷养分输出量。

研究选取3个自然因素和8个人为因素分析其对

流域养分输出变化(总氮和总磷输出量)的影响。自然因素包括降雨、蒸发、气温等;人为因素包括植被恢复、土地利用、水土保持治理、人口、农民人均纯收入、土地利用程度综合指数、氮肥平均施用量、磷肥平均施用量。其中:年降雨量数据来源于湄水河流域出口雨量站监测逐日监测数据(1978—2009年);1978—2009年年蒸发量、年均气温等长期观测数据来源于兴国县气象台监测资料;植被恢复数据由植被指数表征,来源于美国NOAA卫星,2000年后该卫星失效,采用MODIS卫星影像提取;考虑到湄水河流域大规模水土输出治理工作的阶段性特点,且2002年后流域水土输出治理工作基本结束,流域内的土地利用格局基本进入一个相对稳定的状态,因此本文选择7个典型特征年(1975、1987、1991、1995、2000、2002、2005)的土地利用数据作为基础数据,数据由美国Land sat系列卫星遥感影像目视解译获得,分类采用第二次全国土地调查土地分类标准进行。此外基于刘纪远等^[12]提出的土地利用程度计算方法,获得了7个年度流域土地利用程度综合指数;水土保持治理面积和分布数据来源于流域所在县——兴国县水土保持局;流域氮肥、磷肥年均施用量、人口变化、农民人均纯收入等人为因素数据来源于实地调查和1978—2009年《兴国县统计年鉴》。

1.3 统计分析方法

部分典范对应分析(partial canonical correspondence analysis, PCCA)是在典范对应分析CCA基础上加入了变量分割(分类)技术,可以计算不同类型环境因子绝对贡献率的一种数量生态学统计方法^[13]。本研究将影响因素分为人为和自然两类因素,采用PCCA方法分析人为因素和自然因素的单独作用及其交互作用大小,并利用膨胀系数 $VIF>20$ (variance inflation factor, VIF)来剔除具有共线性关系的变量。

集成推进树算法(aggregated boosted trees, ABT)是基于PAC模型(probably approximately correct, PAC)的学习分类算法,可以用简单的图形和数字表达复杂的关系,预测精度高^[14]。针对流域养分输出的影响因子复杂的特点,本文选择ABT统计方法分析不同因子对氮磷输出的相对影响大小,评价影响氮磷输出变化的主控因子。在ABT分析中,剔除贡献率 $<5\%$ 的影响因子,优化最终的因子集。

PCCA和ABT分析分别在国际通用软件R的编程环境下通过开源模块“Vegan”和“gbmplus”实现。

1.4 SWAT模型反演

我国的东南红壤丘陵区自20世纪80年代以来,

普遍经历了一个以小流域水土输出治理为主要手段的生态环境恢复过程,土地利用格局和经济社会状况发生了较大改变,人们对这些流域的水沙迁移变化较为关注,而从流域角度特别是中大尺度流域角度研究氮磷输出的则较少,大部分流域缺乏氮磷等长期观测数据,本研究在研究区湫水河流域卡口站也仅仅获得了 2002 年 10 月以后的氮磷输出数据。监测数据的缺失给该流域氮磷输出变化规律和主控因素的研究带来了困难。因此,为在较大尺度对比研究流域治理前后氮磷输出的变化规律,以及自然和人为因素长期作用下氮磷输出的主控因子以及相对影响大小,本研究采用大型分布式流域水文和污染模拟模型 SWAT 反演了 1978—2009 年流域的年总氮和总磷输出量,其中,1978—2003 年的模拟数据用作对比不同阶段的变化规律和影响因子分析,2003—2009 年的数据用来验证模型精度。

SWAT 模型模拟需要基于数字高程模型以及土地利用和土壤类型数据划分流域水文单元,然后在输入气象、土壤理化、农业种植管理措施等数据的基

础上进行模拟。研究利用湫水河流域 1:5 万数字高程数据划分了 62 个子流域,同时为提高模型的模拟精度,土地利用分类数据分别采用了 1975、1991 和 2005 年的遥感解译数据,以此模拟不同水土输出治理阶段(治理前、第一阶段治理、第二阶段治理)氮磷输出状况,土壤类型数据则采用了第二次全国土壤普查 1:20 万数据,在此基础上进行流域水文单元的划分,气象参数化数据则来源于卡口站的逐日监测数据,土壤理化数据则来源于流域 13 个点位的实测数据,农业种植管理措施数据则来源于实地调查的流域主要作物(双季水稻)种植管理数据。

本研究采用国际上通用的流域水文模型模拟精度检验方法:误差百分比(DV)、Nash-Sutcliffe coefficient (E_{NS})两个指标来对模拟精度进行验证,验证数据来自于 2003—2009 年湫水河实测总氮和总磷输出数据(表 1),总体模拟精度较高,其中总氮和总磷模拟平均 DV 分别为 85.6% 和 84.4%, E_{NS} 分别达到 85.8 和 84.2($E_{NS}>60$ 表示模拟精度较好)。

表 1 2003—2009 年湫水河流域年径流量实测及模拟结果以及模拟精度

Table 1 The annual mean streamflow yields simulated and observed and simulation accuracy from 2003 to 2009 in the Lianshui River basin

年份	总氮			总磷		
	实测值(kg)	模拟值(kg)	$DV(\%)$	实测值(kg)	模拟值(kg)	$DV(\%)$
2003	252 444.9	327 804	70.1	42 803.0	56 534	67.9
2004	371 033.7	410 150	89.5	79 044.9	87 226	89.7
2005	1 626 844.0	1 492 109	91.7	124 069.2	108 294	87.3
2006	710 286.4	759 216	93.1	53 434.1	59 428	88.8
2007	633 905.9	729 387	84.9	55 551.9	63 742	85.3
2008	620 785.9	598 293	96.4	105 962.9	98 872	93.3
2009	254 513.4	322 149	73.4	26 178.5	31 693	78.9
拟合精度	DV	85.6			84.4	
	E_{NS}	85.8			84.2	

2 结果与讨论

2.1 2003—2009 年湫水河流域养分输出量的变化

由表 2 可知:湫水河流域年均总氮和总磷输出量分别为 638.5 t 和 69.6 t,单位面积年均总氮和总磷输出量分别为 1.10 t 和 0.12 t,流域总氮和总磷输出量年际间变化较大,变异系数(CV)均值分别为 74.3% 和 50.6%(表 2,图 1)。养分输出实测数据中水样年均氮、磷输出量占总输出量的 83.2%、32.1%,泥沙样中的年均氮、磷输出量占比则为 16.8%、67.9%。水样中氮素输出高于泥沙,泥沙中磷素输出高于水样。2005 年水样总氮输出量和其他年份

相差很大,但水样总磷的差异不明显,这可能是由于水样中氮素输出主要取决于径流量的大小,而磷素的输出则与径流量相关性较弱,主要取决于泥沙含量。

湫水河流域水土输出治理从 1983 年开始,主要经历了两个阶段。第一阶段为 1983—1990 年,治理总面积为 128.6 km²,第二阶段为 1993—2002 年,治理总面积为 23.6 km²,两个阶段治理面积占流域总面积的 26%。本研究首先利用 1975、1991 和 2005 年的遥感解译数据提取 3 个时期(治理前、第一阶段治理、第二阶段治理)流域土地利用信息,然后利用 SWAT 模型反演氮磷输出量,最后分析 3 个时期氮磷输出的

表 2 潞水河流域 2003—2009 年总氮及总磷输出量监测值(kg/a)
Table 2 The annual exports of total N and total P through streamflow and sediment during 2003 to 2009 in Lianshui River basin based on observation

年份	总氮			总磷		
	水样	泥沙样	合计	水样	泥沙样	合计
2003	189 395.6	63 049.3	252 444.9	15 664.1	27 138.9	42 803.0
2004	269 987.0	101 046.7	371 033.7	38 334.0	40 719.9	79 044.9
2005	1 390 662.7	236 181.0	1 626 843.7	30 621.2	93 448.0	124 069.2
2006	630 516.8	79 769.6	710 286.4	18 831.7	34 602.9	53 434.1
2007	517 094.2	116 811.8	633 905.9	32 66.5	52 285.4	55 551.9
2008	494 320.4	126 465.5	620 785.9	38 205.1	67 757.7	105 962.9
2009	228 975.6	25 537.8	254 513.4	11 456.7	14 721.8	26 178.5
CV%	77.8	62.1	74.3	61.0	56.3	50.6

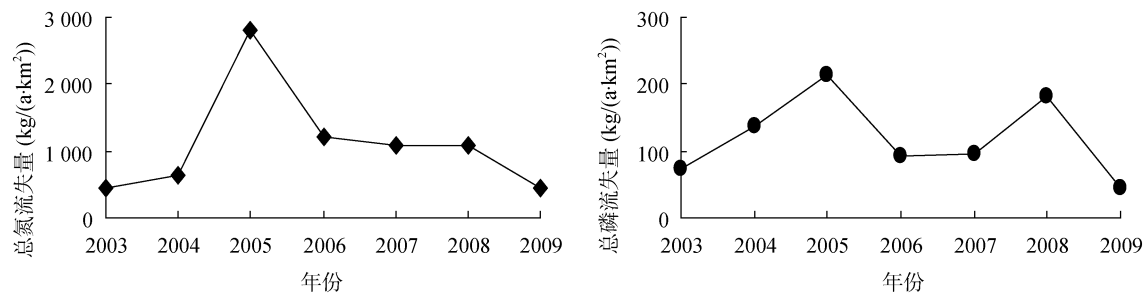


图 1 潞水河流域 2003—2009 年单位面积总氮和总磷年输出量变化
Fig. 1 Changes of the annual total losses of total N and total P during 2003 to 2009 in Lianshui River basin

变化。结果表明：流域年均总氮、总磷输出量治理前(1978—1982 年)为 1 182.2 t 和 378.6 t，治理第一阶段(1983—1992 年)为 664.7 t 和 87.6 t，治理第二阶段(1993—2003 年)为 476.4 t 和 63.7 t。经过第一阶段治理后，总氮、总磷输出量分别下降 43.8%、51.0%，第二阶段比第一阶段分别下降 28.3%、27.2%，说明经过持续的大规模水土输出治理，流域氮磷输出量显著下降(图 2)。

潞水河流域是一个较为封闭、以农业为主的流域，在 1978—2003 年间最大的土地利用结构变化来自于实施水土保持治理带来的流域森林面积的变化，森林覆盖率由 1975 年的 43.8% 上升到 2005 年的 76.0%。前期的研究表明^[15]，潞水河流域治理后

(1984—2009 年)年径流产出量多年平均值比治理前(1971—1983 年)减少了 7.7%，年输沙量则显著下降了 28.5%。2003—2009 年的监测表明，流域泥沙输出的氮、磷养分量占总输出量的 16.8% 和 67.9%。因此，长期的水土输出治理(主要是植被恢复措施)必然会影响到流域径流泥沙的产出，最终导致流域养分输出量的变化。此外，2003—2009 年的潞水河流域的实测氮磷输出值并没有表现出明显的减少趋势，这一方面可能与气候条件(降雨量和蒸发量)的波动有关，另一方面可能是因为在治理后期，流域植被面积变化已经处于较为稳定的状态，但水土输出治理中种植的大面积人工马尾松林下植被较差，短期内可能无法有效减少产流和产沙以及氮磷的输出^[2]。

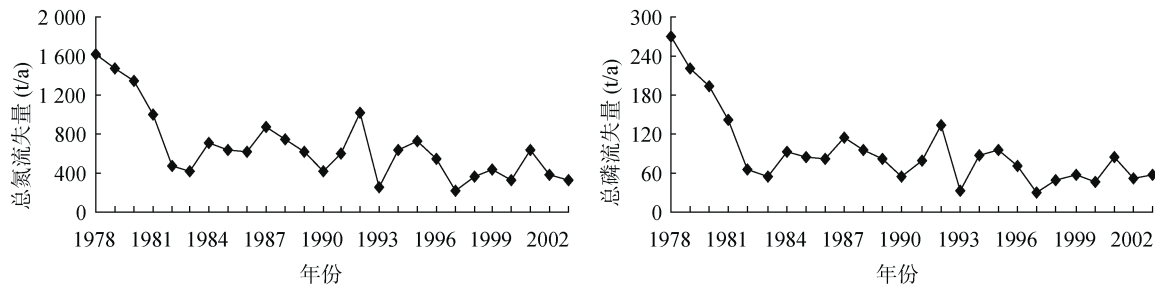


图 2 潞水河流域 1978—2003 年总氮和总磷模型反演输出量变化
Fig. 2 Changes of the annual total exports of total N and total P during 1978 to 2003 in Lianshui River basin based on SWAT model inversion

2.2 自然和人为因素对流域氮磷养分输出的交互影响及贡献率

本研究利用 PCCA 方法来分析自然和人为因素对流域氮磷输出的贡献大小。PCCA 分析针对的是全部影响因子的贡献,包含了其他未知因素和变量之间的交互作用贡献,同时它的变量分割技术可以将不同类型的环境因子分类并计算出在限制其他类型因素影响后的各类因素的“纯贡献率”。PCCA 分析需要构造两个矩阵,一个是环境变量矩阵,另一个是因变量矩阵,环境变量矩阵采用前述 7 个典型年的 11 个自然和人为因子构成,因变量矩阵则由相应 7 年的氮磷输出 SWAT 反演数据组成,其数据项包括总氮、总磷、有机氮、硝态氮以及有机磷、矿物磷等反演数据。分析过程中,剔除了膨胀系数 $VIF > 20$ 具有共线性关系的变量,保留了气候和人为作用两类影响因素,并最终获得这两类因素贡献大小,结果见图 3。

由图 3 可知,1978—2009 年流域总氮输出量的变化,气候因素(降雨、蒸发)解释了 23.2%,人为因素(人口、植被指数、水田面积、氮肥施用量等)解释了 48.7%,气候与人为因素的交互作用解释了 16.5%,

其他未知因素则解释了 11.6%(图 3A)。1978—2009 年流域总磷输出量的变化(图 3B),气候因素(降雨、蒸发)解释了 22.8%,人为因素(植被指数、水田面积、磷肥施用量等)解释了 38.9%,两类因素之间的交互作用解释了 15.7%,其他未知因素则解释了 22.6%。

从分析结果看,人为因素对流域氮、磷输出量长期变化的影响显著大于气候因素。除人口和氮磷肥料施用量外,人为因素中植被指数、水田面积变化是流域土地利用结构变化的表征性指标,特别是植被指数的变化,直接反映了 30 多年来流域中林地面积变化,根据遥感土地利用解译结果,经过大规模长期的水土保持治理,潞水河流域林地占总面积的比例由 1975 年的 43.8% 上升到 2005 年的 76.0%。植树造林增加了对径流和泥沙的拦截能力,从而影响了土壤侵蚀和养分传输,而植被的增加也带来森林蒸腾作用的加强,也间接影响了流域的产水产沙能力,并最终导致氮磷养分输出的变化。水田面积的变化则不但直接影响化肥施用量的多寡,同时也直接影响了氮磷等养分的输出。由此可见,土地利用结构变化、人口、化肥施用量等人为因子共同作用,在潞水河长期的氮磷输出中起到了主要作用。

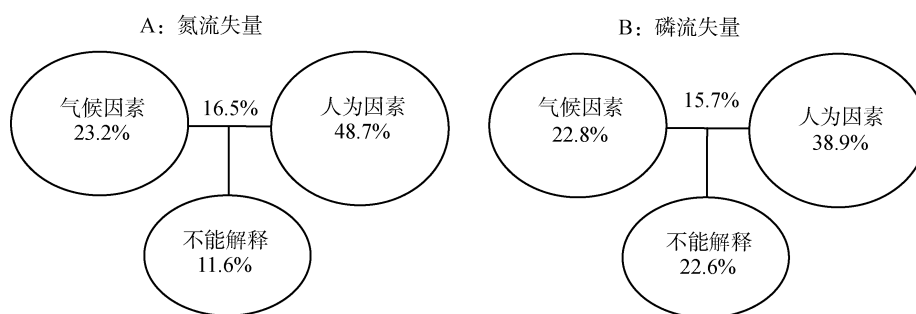


图 3 人为和气候因素对潞水河流域总氮和总磷输出量的贡献率

Fig. 3 Contributions of climate and human factors to the total losses of N(A) and P(B) in Lianshui River basin

2.3 人为因素对流域氮磷输出的相对影响

由上文可知,人为因素对潞水河流域氮磷输出的影响大于气候因素,而气候因素属于不可调控的自然因素,因此,必须重点对人为因素进行分析,计算其单个因子的影响大小并找出主要影响因子。PCCA 分析方法是针对所有的影响因素,包括各类已知影响因素和未知因素,为进一步分析人为因素中单个因子对流域氮磷输出的相对影响大小,本研究进一步采用了 ABT 统计方法。ABT 分析方法可以准确地计算出每一个因子的相对影响大小并给出因子与氮磷输出的偏相关图,这为比较不同因子的相对重要性以及直观地分析其影响提供了帮助。在 ABT 分析过程中,本研究剔除了原始数据集中的降雨、蒸发和气温数据,

保留了 PCCA 分析中的人为影响因素和 SWAT 反演的总氮、总磷数据项,分析过程通过统计软件 R 编程环境下的“gbmplus”模块进行。

分析结果表明,人为因素中影响氮素输出的主要因子(剔除了相对影响小于 5% 的因子)排序为人口(50.5%)>氮肥施用(15.2%)>疏林地(12.5%)>植被指数(12.3%)>土地利用指数(9.5%),影响磷素输出的主要因子(剔除了相对影响小于 5% 的因子)排序为人口(38.9%)>疏林地(25.8%)>土地利用指数(18.1%)>植被指数(10.7%)>磷肥施用(6.5%)。由偏相关关系图可以看出,除植被指数外,人口、疏林地、土地利用指数、氮磷肥施用等因子都与氮素输出呈正相关关系(图 4)。

ABT 分析表明,人为因素中人口因子对氮磷输

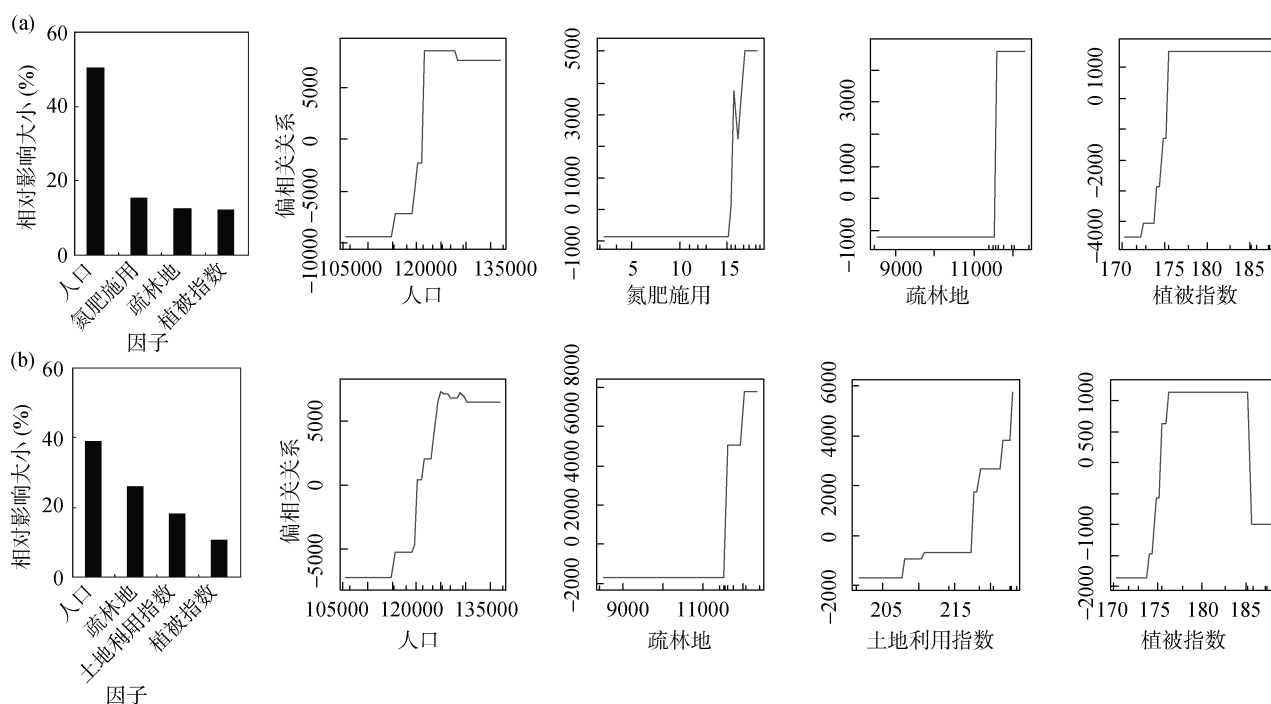


图4 人为因素中主要因子对流域氮(a)、磷(b)输出的偏相关分析

Fig. 4 Partial dependency plots of extracted predictors of total N and total P export from human factors

出的相对影响最大。流域氮磷输出来源包括耕地施肥、土壤有机物矿化、居民生活以及畜禽养殖,特别是农村生活源和畜禽养殖的氮磷输出已成为农业面源污染的主要来源,而这两个来源都与流域人口密度有关。湄水河流域人口密度从1978年的181人/km²上升到2005年的235人/km²,增加了22.8%,因此人口对流域氮磷输出影响较大。

我国化肥的过量施用已成为农业面源污染的主要来源之一。湄水河流域中耕地以水田为主,如果流域氮磷输出量全部折算为水田,其单位面积总氮和总磷流失量分别为57.77 kg/hm²和6.29 kg/hm²。而在赣江流域下游(赣鄱平原、赣抚平原和吉泰盆地)稻田年均总氮和总磷流失量分别为39.7 kg/hm²和11.7 kg/hm²^[16]。因此丘陵流域总氮输出明显高于平原盆地地区,而总磷输出相当。ABT分析也表明,氮肥和磷肥施用因子对流域氮磷输出的相对影响分别为15.2%和6.5%,在人为因素中分别排第二位和第五位。磷肥施用的相对影响较氮肥低,主要是由于氮素在土壤和水体中转化和迁移速率大,而磷素易于被土壤固定。据估算,我国农田化肥氮在当季作物收获时,淋洗和径流损失分别占5%和2%,表观硝化和反硝化占34%,氨挥发占11%^[17]。而红壤对磷素具有很强的固定作用,红壤中固定磷(P)量为100~150 mg/kg,占旱地磷肥施用量的60%,水田磷肥施用量的85%^[18]。

Basnyat 等人^[19]认为流域的土地利用/覆盖、坡

度、土壤属性影响着流域水文和水质变化,从而控制着产沙和化学物质浓度。Lenhart 等人^[20]则认为植树造林增加了对径流和泥沙的拦截能力,从而影响了土壤侵蚀和养分传输。ABT分析结果中,人为因素中人口是主要的影响因素,其他重要的影响因素包括氮磷肥施用量、疏林地面积、土地利用程度和植被指数,这3个因子都与流域土地利用结构变化有关,而湄水河流域1978—2009年土地利用格局变化最大的利用类型是由长期大规模水土流失治理带来的林地面积的变化,这种变化显著减少了流域泥沙的输出(减少了28.5%),并最终导致了氮磷等污染负荷输出的减少。因此,在控制人口密度和合理施肥的基础上,通过水土流失治理,增加流域森林面积、改善森林质量,调整土地利用方式是保护亚热带红壤丘陵区流域生态环境、促进经济社会发展的重要手段。此外,由于气候因素对养分流失仍然起重要作用,未来在流域水土保持工作中,仍然需要针对南方高温多雨、极端和灾害性天气多的特点,提出有效的植被恢复技术体系,特别是要改善森林覆被质量,提高林下植被覆盖度。同时,基于区域农业面源污染控制的“4R”理论体系^[21],即减量(reduce)、过程阻断(retain)、养分再利用(reuse)和生态修复(restore),针对红壤丘陵区水土流失过程的特征,首先在源头减少产流和产沙,然后加强“乔—灌—草”和“林—果—农”等丘陵立体模式的构建,增加对径流泥沙的截留和再利用,实现对

流域养分流失的有效控制。

3 结论

(1) 模型反演结果表明,随着治理进程推进,湫水河流域多年平均养分输出量显著下降。2003—2009 年流域总氮和总磷平均输出量分别为 $1.10 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 和 $0.12 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,其中氮素输出主要来自径流,磷素输出主要来自泥沙。

(2) 人为因素对湫水河流域氮磷养分输出的贡献高于气候因素。人为因素(植被恢复+水田面积+氮肥施用量)对湫水河流域总氮、总磷输出量变化贡献率分别 48.7%、38.9%,气候因素(年降雨量+年蒸发量)贡献率分别为 23.2%、22.8%,两者交互作用贡献率分别为 16.5% 和 15.7%。

(3) 人口、土地利用指数、疏林地面积、植被指数以及氮肥施用量是影响流域氮磷输出的最主要因子。因此,在流域氮磷养分输出治理中,有必要在控制流域人口密度、科学合理施用化肥的基础上,通过水土流失治理等措施调整流域土地利用结构,以实现流域氮磷输出的控制。

参考文献:

- [1] 杨林章, 孙波. 中国农田生态系统养分循环和平衡及其管理[M]. 北京: 科学出版社, 2008
- [2] 水利部, 中国科学院, 中国工程院. 中国水土输出防治与生态安全: 南方红壤区卷[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 1-275
- [3] 杨金玲, 张甘霖. 皖南低山丘陵地区流域氮磷径流输出特征[J]. 农村生态环境, 2005, 21(3): 34-37
- [4] Duan SW, Zhang S, Huang HY. 2000. Transport of dissolved inorganic nitrogen from the major rivers to estuaries in China[J]. Nutrient Cycling in Agro ecosystems, 2000, 57(1): 13-22
- [5] Xing GX, Zhu ZL. Regional nitrogen budgets for China and its major watersheds[J]. Biogeochemistry, 2002: 57/58: 405-427
- [6] Ti CP, Yan XY. Spatial and temporal variations of river nitrogen export from major basins in China[J]. Environ Science Pollution Resource Research. 2013, 20(9): 6 509-6520
- [7] 高学民, 陈静生, 王立新. Logistic Regression 在我国河流水系氮污染研究中的应用[J]. 环境科学学报, 2000, 20(6): 666-681
- [8] 宋立芳, 王毅, 吴金水. 水稻种植对中亚热带红壤丘陵区小流域氮磷养分输出的影响[J]. 环境科学, 2014, 35(1): 150-156
- [9] 李硕, 孙波, 曾志远, 赵其国. 遥感和 GIS 辅助下流域养分迁移过程的计算机模拟[J]. 应用生态学报, 2004, 15(2): 278-282
- [10] 胡连伍, 王学军, 罗定贵, 蒋颖. 基于 SWAT 2000 模型的流域氮营养环境自净效率模拟—以杭埠—丰乐河流域为例[J]. 地理与地理信息科学, 2006, 22(2): 35-38
- [11] 谢贤群, 王立军. 水环境要素观测与分析[M]. 北京: 中国标准出版社, 1998
- [12] 刘纪远等. 西藏自治区土地利用[M]. 北京: 科学出版社, 1992
- [13] Williams LR, Bonner TH, Hudson JD, William MG, Leavy TR, and Williams CS. Interactive Effects of Environmental Variability and Military Training on Stream Biota of Three Headwater Drainages in Western Louisiana[J]. Trans. Amer. Fish. Soc., 2005, 134(1): 192-206
- [14] De'ath. Boosted trees for ecological modeling and prediction[J]. Ecological Society of America, 2007, 88(1): 243-251
- [15] Li Shuo, Xu Ming, Sun Bo. Long-term hydrological response to reforestation in a large watershed in southeastern China[J]. Hydrological Processes, 2013, 2: 126-136
- [16] 余进祥, 赵小敏, 吕婭, 刘娅菲. 鄱阳湖流域不同农业利用方式下的氮磷输出特征[J]. 江西农业大学学报. 2010, 32(2): 394-402
- [17] 朱兆良. 合理使用化肥充分利用有机肥发展环境友好的施肥体系[J]. 中国科学院院刊, 2003, (2): 89-93
- [18] 鲁如坤. 土壤-植物营养学原理和施肥[M]. 北京: 化学工业出版社, 1998: 199-201
- [19] Basnyat P, Teeter L, Lockaby B. The use of remote sensing and GIS in watershed level analyses of non-point source pollution problems[J]. Forest Ecology and Management, 2000, 128: 65-73
- [20] Lenhart T, Fohrer N, Frede HG. Effects of land use changes on the nutrient balance in mesoscale catchments[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2003, 28: 1 301-1 309
- [21] 杨林章, 冯彦房, 施卫明. 我国农业面源污染治理技术研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(1): 96-101

Long-term Changes of Nitrogen and Phosphorus Exports and Their Affecting Factors in a Basin in Subtropical China

REN Sheng-ming^{1,2,3}, CAO Long-xi¹, SUN Bo^{1*}

(1 *Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*; 2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 3 *Office of the Mountain-River-Lake Development Committee of Jiangxi Province, Nanchang 330046, China*)

Abstract: The long-term changes of nutrition exports from 1978 to 2009 were studied by monitoring and SWAT model inversion in the Lianshui River basin (579 km²) in the red soil hilly region with middle subtropical climate. The relative influences of different climate and human factors on the nutrition exports were quantified by aggregated boosted trees (ABT) and partial canonical correspondence analysis (PCCA). The monitoring results showed that the amounts of annual average total nitrogen and phosphorus loss were 1.10 t/(km²·a) and 0.12 t/(km²·a) during 2003 to 2009. The SWAT model inversion showed a marked reduction of nutrient export with the long-term practices (forest restoration) of water and soil conservation in the basin since 1983. The mean annual total nitrogen and phosphorus export were reduced by 43.8% and 51.0% respectively during the first remediation period (1983—1990) in comparison with the pre-remediation period (1978—1982), and were reduced by 28.3% and 27.2% respectively in the second remediation period (1993—2002) in comparison with the first one. As a whole, the human factors showed higher influence on the basin nutrition export than the climate factors. Human factors explained 48.7% and 38.9% of the variation of total nitrogen and phosphorus exports, respectively, whereas climate factors explained 23.2% and 22.8% respectively. The ABT analysis showed that the main important factors include population, fertilization, sparse woodland area, land use index and vegetation index. Therefore, it is important to reduce nutrition export by changing the structure of land use, besides controlling the population density and scientific and reasonable fertilization.

Key words: Subtropical China, Basin, N and P export, Influence factors, Aggregated boosted trees, Partial canonical correspondence analysis