

欧阳威, 徐逸, 黄浩波, 等. 东北低温农区近四十年气温降水变化及其对面源氮磷输出影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(7): 1285–1292.

OUYANG Wei, XU Yi, HUANG Hao-bo, et al. Climate variation in the past forty years and its impact on non-point source pollution in northeast hypothermia agricultural region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(7): 1285–1292.

东北低温农区近四十年气温降水变化及其对面源氮磷输出影响

欧阳威, 徐逸, 黄浩波, 杨万新, 王丽

(北京师范大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100875)

摘要: 为了解在全球气候变化背景下, 流域氮磷输出对雨温条件变化的响应, 选取我国三江平原典型低温农区, 在详细分析 1975—2014 年历史气象数据的基础上, 利用 SWAT 模型, 明确了阿布胶河流域的氮磷流失特征。结果表明: 研究区近 40 年日平均气温以 $0.132\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 的微弱趋势上升, 降水量自 20 世纪 80 年代开始呈下降趋势, 总减少量不超过 140 mm, 且年际差异较大 ($11.60\sim 415.50\text{ mm}$); N、P 输出与降水量显著正相关, 丰水年的输出量分别是枯水年的 1.5、2.5 倍, 且对降水变化的敏感性随降水量升高而降低; N、P 输出总体与温度呈负相关, 随温度的变化率分别为 $0.937\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ 和 $0.161\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。多年氮磷输出量在温度升高和降水减少的情势下上升, 表明人为因素对污染输出可能产生更大影响, 未来在低温农区开展面源氮磷输出对气候响应的针对性研究中有必要考虑自然和人为效应的区分。

关键词: 气候变化; 农业面源; SWAT 模型; 氮磷流失; 相关分析

中图分类号: X592 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2017)07-1285-08 doi:10.11654/jaes.2017-0093

Climate variation in the past forty years and its impact on non-point source pollution in northeast hypothermia agricultural region

OUYANG Wei, XU Yi, HUANG Hao-bo, YANG Wan-xin, WANG Li

(School of Environment, State Key Laboratory of Water Environment Simulation, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Understanding the responses of nitrogen and phosphorus outputs to precipitation and temperature is vital for agricultural non-point source pollution under climate change. Nitrogen and phosphorus pollution loss characteristics of a typical low-temperature agricultural region in the Sanjiang Plain of China was simulated in this study using the SWAT model based on meteorological factors from 1975 to 2014. The average daily temperature increased with a slight trend of $0.132\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$, while precipitation began to decline since the 1980s, with a total reduction less than 140 mm and large differences in annual yield ($11.60\sim 415.50\text{ mm}$). N and P outputs were positively correlated with precipitation. The N and P yields of high flow years were 1.5- and 2.5-fold, respectively, higher than that of low flow years, and the sensitivity of variation decreased with the increase of precipitation. In contrast, N and P outputs were negatively correlated with temperature ($0.937\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$, $0.161\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$). Yearly data showed an increase in N and P outputs under climate change in the study area, which revealed that anthropic factors might play an important role. Therefore, for studies on the response of non-point nitrogen and phosphorus output to future climate change, it is necessary to consider both impact of nature and humans.

Keywords: climate change; agricultural non-point source pollution; SWAT model; losses of nitrogen and phosphorus; correlation analysis

收稿日期: 2017-01-17

作者简介: 欧阳威 (1980—), 男, 江西萍乡人, 教授, 主要研究方向为水文水资源及非点源污染控制。E-mail: wei@bnu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFD0800503); 国家自然科学基金优秀青年科学项目 (41622110)

Project supported: The National Key Research and Development Program (2016YFD0800503); The National Science Fund for Distinguished Young Scholars (41622110)

农业面源污染(Agricultural non-point pollution)是当前水环境情势面临的主要问题之一,大量研究表明,农业面源污染是水体中氮磷的主要来源^[1-2]。在我国,农业面源贡献总氮(TN)、总磷(TP)分别占排放总量的57%和67%(国家统计局,2010),其输出形式主要为溶解态和颗粒态。溶解态氮磷在径流冲刷下进入水体,颗粒态以吸附的形式由土壤侵蚀进入水体^[3]。

当前,世界各地气候变化程度不同,气温和降水是面源污染的主要驱动因子^[4],因此农业面源污染对气候变化的响应逐渐受到关注。Bouraoui等^[5]在芬兰南部模拟的34年月平均氮磷输出结果表明,气候变化使氮磷污染输出分别增加3.4%和2.5%。除月际差异外,Wu等^[6]在嘉陵江的研究发现,考虑到不同降雨强度的影响,污染负荷存在年际差异。Morales等^[7]在美国东北地区的研究发现,气候变化引起土壤温度的增加使硝态氮流失减少,而 N_2 输出增加21%~37%。赵越等^[8]对安徽率水流域的研究表明,受气候变化影响,地下水氮通量略有增加,磷通量有一定程度下降。因此,不同地区氮磷输出对气候变化的响应不同。

数据显示中国中高纬度地区气温升高幅度为 $2.66\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 100\text{ a}^{-1}$,较其他地区严重($2.13\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 100\text{ a}^{-1}$),降水变化趋势在南部和北部明显不同,受气候变化影响较大。此外,寒冷地区面源污染输出受冻融作用影响^[9],而气候变暖增加了冻融循环的频率^[10],直接影响氮磷流失。位于中高纬度地区的三江平原低温农区,是我国重要的粮食生产基地^[11],该地区几大河流的TN和TP浓度分别为 $0.97\sim 0.21\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.046\sim 0.095\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,由面源污染导致的流域生态恶化,严重威胁农区粮食安全^[12]。基于该地区受气候变化影响的显著性和在我国粮食产业中的重要地位,有必要在此进行农业面源污染对气候变化的响应研究。SWAT、L-THIA^[13]、AnnAGNPS^[14]等水文水质模型方法都曾被应用于农业面源污染相关的研究中。SWAT模型在模拟精度和适用性上表现出众^[15],且在我国中高纬度地区适用性较好,在Ouyang等^[2]对挠力河流域的SWAT模拟中Nash-Sutcliffe系数大于0.698,模拟结果较准确,因此为本研究所选用。

本文选择三江平原八五九农场的阿布胶河小流域作为研究区域,通过数据搜集,深入分析了该区域气温、降水多年变化趋势,在此基础上,利用SWAT模型进行全流域面源污染流失核算,以期达到以下目的:一方面细化低温农区气候变化相关研究,另一方面识别中高纬度低温农区面源氮磷输出对气候变化的响

应,作为该区域开展气候变化影响下未来面源污染趋势研究的基础和制定相关防控措施的科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

阿布胶河流域位于三江平原东北部,八五九农场西南,全长38 km,流域面积 142.9 km^2 。该区域为寒温带湿润半湿润大陆性季风气候,年均日气温 $-13.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,全年将近6个月气温低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。流域内共涉及7种土壤类型,其中草甸土和草甸白浆土分别占28.01%和18.42%,其具体位置、主要站点和土壤类型分布如图1所示。

研究区耕作措施经历了平翻-深松耙茬-浅翻深松的变更,20世纪80年代以来,水稻(2014年种植面积占总面积的53%)逐渐代替小麦,与大豆、玉米(占总面积的21.04%)共同成为主要种植作物,且单位面积施肥量大幅增加,2014年施肥量约为1975年的2倍。

1.2 数据处理分析

利用八五九农场气象站1975—2014年的逐日气象数据,包括日最高/最低气温、日降水量、相对湿度、风速、日照时数6个指标建立气象数据库,然后根据Mann-Kendall法趋势分析获得气象变化趋势,并绘制皮尔逊Ⅲ型频率曲线观察年际降水量的离散程度。使用Excel 2013进行数据综合整理,DPS数据处理系统进行趋势性分析,SPSS 13.0对气象因子和氮磷输出数据做Spearman相关分析。

1.3 SWAT模型建立与校准

本研究基于已有案例研究开展,空间数据使用ARCGIS 10.1和ENVI处理,属性数据使用SWAT自带模块结合SPAW处理,数据类型及获取途径如表1所示,构建方法见文献[16]。

根据不同时期的土地利用,划分1975—1984、1985—1994、1995—2004、2005—2014(S1~S4)四个连续时间段分别进行氮磷输出模拟。参照土地利用分类标准,将研究区土地分为林地、旱田、水田、城镇用地、湿地、草地和水体7类,具体分布情况见文献[18]。敏感性分析采用SWAT自带分析模块,对径流、泥沙模拟所涉及的全部参数进行绝对敏感性分析。模型应用设置汇水区域阈值为 300 hm^2 ,共划分12个子流域。在每个子流域内划分水文响应单元HRU,前后四期不同土地利用的模拟中分别划分了114、117、146、119个HRU。由于研究区面积过小,无有效的长期水

文观测数据,采用国际上普遍使用的数据移植进行率定^[19]。采用的参数大部分移植邻近的挠力河流域,分析和率定结果如表 2 所示。率定期的 R^2 值都在 0.73 以上,NS 系数在 0.75 以上;验证期的 R^2 值都在 0.79

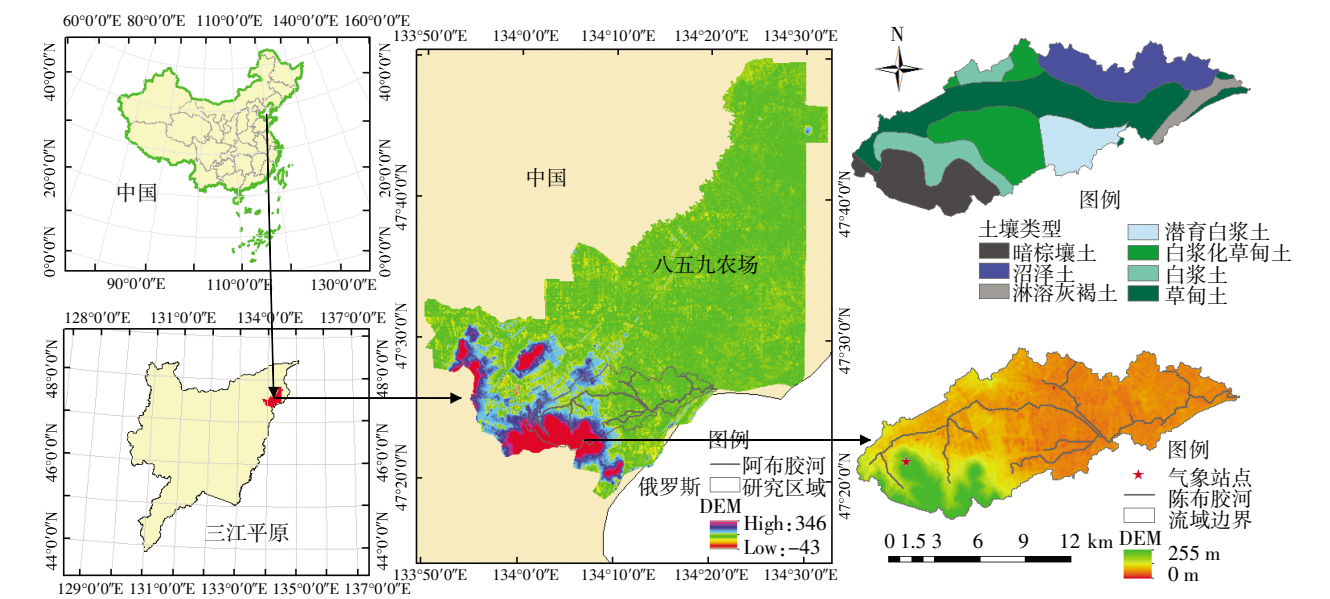


图 1 研究区地理位置、数字高程图、土壤性质和监测站点

Figure 1 Location information, DEM, soils and monitoring stations of the study area

表 1 SWAT 模型输入数据及获取途径

Table 1 Input data of SWAT model and sources

数据类型	获取途径
空间数据	地理空间数据云平台(www.gscloud.cn): ASTER GDEM 数据集, 30 m 分辨率原始 DEM 数据
土地利用	USGS 官方网站(http://glovis.usgs.gov/): 1979、1992、1999、2014 年四个时期的 30 m×30 m 分辨率的遥感影像,通过 ENVI 软件对影像进行自动或目视解译
土壤类型	南京土壤所: 1:100 万土壤类型
土壤属性数据库	全国土壤普查数据历史数据,包括 pH、粒径组成、总氮、有机质、总磷等数据;实地采样,于土地解冻之后和耕地施肥之前,网格法布设 35 个样点,测定机械组成、土壤 pH 值、有机碳、全钾、全磷、速效磷、碱解氮、全氮共 8 个指标,具体操作方式于文献[17]中介绍
气象资料	八五九农场气象站和农场周边饶河县气象站 1975—2014 年逐日观测数据
农田管理措施	《八五九农场志 1970—1984》《八五九农场志 1985—2005》

表 2 模型参数率定表

Table 2 Parameters after calibration and validation

参数	相对最优值	参数	相对最优值	参数	相对最优值
r_CN2.mgt	0.140 78	v_SMTMP.bsn	0.041 82	v_GWQMN.gw	1 274.91
v_ALPHA_BF.gw	0.128 17	v_TIMP.bsn	0.29	v_Usle_P.mgt	0.136 72
v_GW_DELAY.gw	36.182	v_CMN.bsn	0.002	v_Spexp.bsn	1.162 04
v_CH_N2.rte	0.159 7	v_NPERCO.bsn	0.26	v_BC1.swq	0.22
v_CH_K2.rte	38.950 53	v_PSP.bsn	0.7	v_BC2.swq	2
r_SOL_AWC(1-2).sol	0.165 512	v_PPERCO.bsn	15	v_BC3.swq	0.23
r_SOL_K(1-2).sol	141.46	v_PHOSKD.bsn	165	v_BC4.swq	0.01
r_SOL_BD(1).sol	0.293 97	v_CANMX.hru	12.616	v_AI1.wwq	0.08
v_RSDCO.bsn	0.05	v_SPCON.bsn	0.054 302	v_AI2.wwq	0.02
v_ESCO.hru	0.118 748				

注:r-代表按比例调整参数;v-代表直接调整参数值。

以上,NS系数基本在0.6以上。表明模型结果是科学可接受的^[20]。详细说明已发表于文献[21]中。

2 结果与讨论

2.1 历史气象变化规律与趋势分析

研究区近40年气温降水变化趋势如图2所示。年平均最高气温为8.00℃,最低为-2.58℃,近40a气温不断波动变化,且存在多个高温和低温峰值,其中2001年平均温度最低,为1.08℃,1990年最高,为4.21℃,多年平均值为2.81℃。平均年降水量为580.2mm,其中1981年最多,达872.7mm,最早年为1986年,仅385.3mm,变幅达487.4mm。为消除周期变化影响,对数据进行5a滑动平均处理,趋势表明,年降水量从20世纪80年代初开始呈缓慢下降趋势,减少不超过150mm,以1981—1985年5a的平均降水量最大(689.1mm),1974—1978年平均降水量最小(474.2mm),二者相差215.0mm。同时,降水量年际变化较大,40a中年降水量超过750mm的年份出现过4次,年降水量小于420mm的年份出现过3次,1983年以后降水量起伏趋于平缓。

气温和降雨趋势的M-K检验结果如表3所示。从气温因子温度来看,研究区年平均、最高和最低气温的倾斜度 β 均大于0,分别以0.0132、0.0119、0.0201℃·a⁻¹的微弱趋势上升。三者的 $|Z|$ 值分别为1.8684、1.4282、1.9858,小于 $\alpha=0.05$ 时 $Z_{1-\frac{\alpha}{2}}$ 的值1.96,只有最低气温的 $|Z|$ 值略微大于1.96,故接受原假设 H_0 ,表明近40年气温微弱上升,但并不显著。与周晔等^[22]对三江平原1964—2010年的气温分析结果具有相同趋势。针对降水量而言, β 值较小,且 $|Z|$ 值小于 $\alpha=0.05$ 时 $Z_{1-\frac{\alpha}{2}}$ 的值1.96,同样接受原假设 H_0 ,表明在

表3 1975—2014年阿布胶河流域气温、降水量变化趋势的M-K检验表

Table 3 M-K test on trend of temperature and precipitation from 1975 to 2014

项目	平均值	$ Z $	β	H_0
平均气温/℃	2.71	1.868 4*	0.013 2	接受
最高气温/℃	8.00	1.428 2	0.011 9	接受
最低气温/℃	-2.58	1.985 8	0.020 1	接受
降水量/mm	580.18	0.293 5	0.371 7	接受

注:在 $\alpha=0.05$ 的置信水平下, $Z_{1-\frac{\alpha}{2}}=1.96$;在 $\alpha=0.01$ 的置信水平下 $Z_{1-\frac{\alpha}{2}}=2.56$ 。

1975—2014年研究区降水量趋势变化并不显著。

采用皮尔逊Ⅲ型频率曲线对降水量进行保证率分析,结果如图3所示。当保证率为50%时其年降水量为568.7mm,低于平均年降水量580.2mm。近40年超过一半年份的降水量低于平均年降水量。离差系数 $C_v=0.22$,表明降水量分布较离散。

2.2 氮磷负荷年际分布及与气象的相关性

模拟1975—2014年的逐年面源氮磷负荷如图4所示,多年氮磷输出呈波动变化且趋势相近。S1~S4多年平均负荷分别为总氮116.7、112.2、125.7、131.0t,总磷9.8、11.1、11.2、12.3t,二者相差两个数量级,且输出量在四个历史时期总体呈现递增态势。磷流失最高值为29.0t,最低值为3.5t。

对气温(Tem)、降水(Pre)因子与氮(TN)、磷(TP)输出进行两两双变量相关分析,结果如表4所示。TN、TP与Pre在0.01水平上显著正相关,相关系数分别为0.628和0.759,表明氮磷输出受降水量影响较强,输出负荷随降水量增加而增加;Tem与TN在0.05水平上显著负相关,但相关系数不高,表明氮输

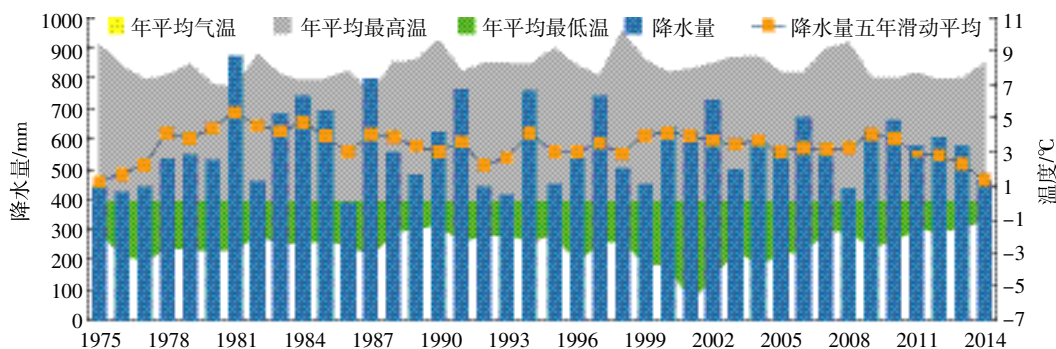


图2 研究区1975—2014年温度降水年际变化

Figure 2 Annual variation of temperature and precipitation in the study area from 1975 to 2014

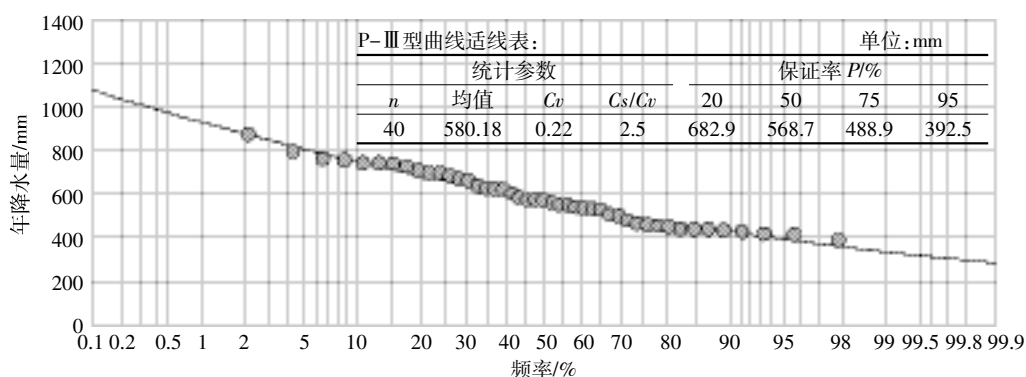


图3 研究区 1975—2014 年降水量频率曲线

Figure 3 Precipitation frequency curve of the study area from 1975 to 2014

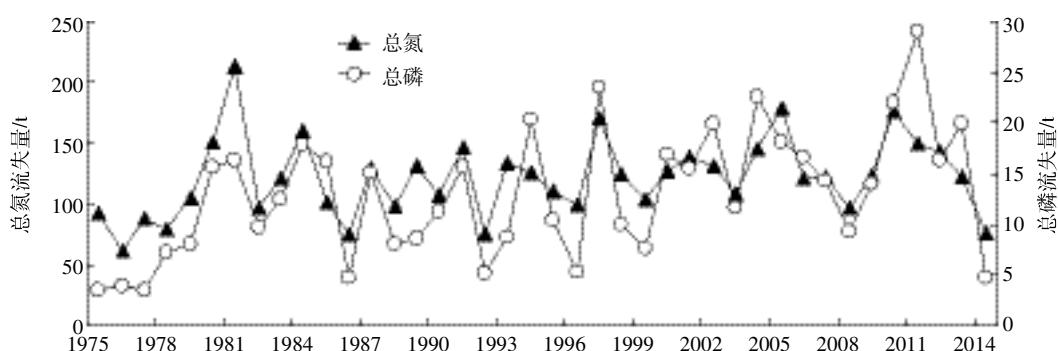


图4 阿布胶河流域出口处 1975—2014 年氮磷流失量

Figure 4 Output of nitrogen and phosphorus in the study area from 1975 to 2014

表4 流域氮磷输出与温度、降水因子的相关系数

Table 4 Correlation coefficient between nitrogen, phosphorus output with temperature and precipitation

因子	指标	TN	TP
Tem	相关系数 Sig.(双侧)	-0.324*	-0.282
		0.042	0.078
Pre	相关系数 Sig.(双侧)	0.628**	0.759**
		<0.001	<0.001

注:*表示 0.05 水平显著相关;**表示 0.01 水平显著相关。

出随温度升高而降低,但温度的影响不大;Tem 与 TP 呈负相关关系,但并不显著。

2.3 降水对氮磷输出的影响

探究不同降水条件下流域 TN、TP 流失状况,结果如图 5 所示。TN、TP 对降水量的响应总体趋势较一致,二者的对数函数的拟合效果较好, R^2 值接近 0.5。表明随着降雨量增加,N、P 的流失程度都有所加重,且流失量升高的趋势随着降水的增加而减缓。

为细化讨论,根据近 40 年降水量的距平百分率进行丰枯分析,将距平百分率大于 10%的年份划分为

丰水年,小于-10%的为枯水年,位于-10%~10%的为平水年,结果如表 5 所示。丰水年年均 TN、TP 负荷量分别为 144.9、17.8 t,是枯水年的 1.5 倍和 2.5 倍。降水量大小直接影响土壤水含量、径流流量大小和速率等,进而影响 N、P 向水体传输^[23-24],在北温带,降水增加提高土壤侵蚀概率,增加污染输出负荷^[6]。耿润哲等^[25]对潮河流域近 20 年的模拟研究表明,丰水年的 TN、TP 分别是枯水年的 3.6 倍和 5.09 倍,大于本研究结果,可能与气候及下垫面特征不同有关。研究数据表明丰水年是面源污染流失的关键年份。

此外,枯水和平水年递增速率较快,而丰水年趋势明显放缓。平水年平均 TN、TP 负荷量分别为 124.8、14.3 t,比枯水年(99.6、7.4 t)分别增加 25.3%和 92.6%,丰水年平均 TN、TP 负荷量分别为 144.9、17.8 t,比平水年分别增加 16.1%和 24.8%。表明在降水量处于 650 mm 以下时,降雨径流冲刷导致的水土流失是农田中氮磷流失的主导因素,且 N 的变化比 P 更为明显。而当降水量进一步增加时,二者的变化趋势趋于平缓。在丰水年,流域 TN 输出仍然呈正向递增趋势,

表 5 1975—2014 年研究区降水丰枯变化特征

Table 5 Characteristics of annual average precipitation changing in the study area from 1975 to 2014											
年份	降水量/mm	距平百分率/%	丰枯类型	年份	降水量/mm	距平百分率/%	丰枯类型	年份	降水量/mm	距平百分率/%	丰枯类型
1975	437.04	-24.67	枯	1978	531.6	-8.37	平	1981	872.7	50.42	丰(涝)
1976	425.42	-26.67	枯(旱)	1979	547.0	-5.72	平	1983	681.8	17.52	丰
1977	439.3	-24.28	枯	1980	526.9	-9.18	平	1984	740.2	27.58	丰(涝)
1982	457.2	-21.20	枯	1988	558.3	-3.77	平	1985	693.7	19.57	丰
1986	385.3	-33.59	枯(旱)	1990	618.6	6.62	平	1987	795.9	37.18	丰(涝)
1989	476.8	-17.82	枯	1996	530.4	-8.58	平	1991	759.5	30.91	丰(涝)
1992	438.3	-24.45	枯	2000	637.1	9.81	平	1994	755.9	30.29	丰(涝)
1993	414.6	-28.54	枯(旱)	2001	623.3	7.43	平	1997	741.6	27.82	丰(涝)
1995	449.4	-22.54	枯	2004	582.6	0.42	平	2002	727.1	25.32	丰(涝)
1998	502.7	-13.35	枯	2005	572.5	-1.32	平	2006	669.0	15.31	丰
1999	450.9	-22.28	枯	2007	549.1	-5.36	平	2010	658.7	13.53	丰
2003	499	-13.99	枯	2009	625.6	7.83	平				
2008	433.1	-25.35	枯(旱)	2011	573.2	-1.20	平				
2014	463.9	-20.04	枯	2012	603.3	3.98	平				
				2013	573.2	-1.20	平				

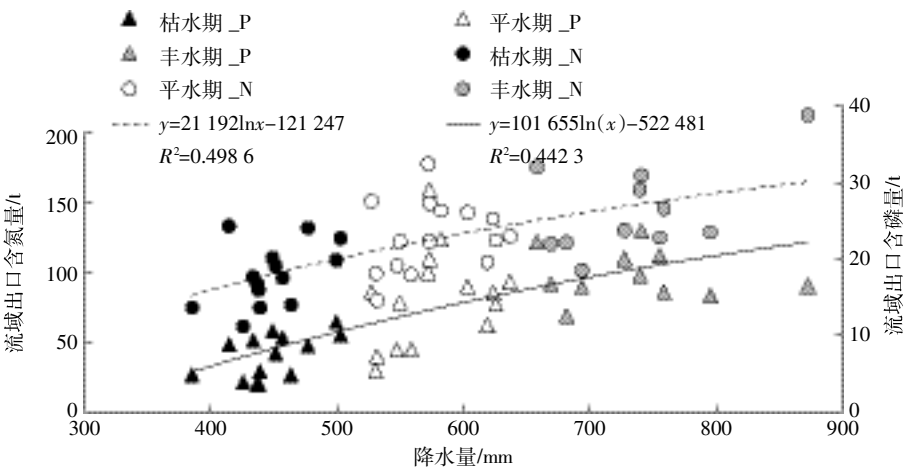


图 5 降水量丰平枯条件下研究区年际总氮、总磷输出负荷

Figure 5 NPS nitrogen and phosphorus yield under different precipitation conditions

而 TP 输出变化不明显。表明当年降水量在 650 mm 以上时,在氮磷的流失机制中,主导因子与在中低水平降水量年份时不同。

2.4 温度对氮磷输出的影响

不同温度条件下流域 TN、TP 污染流失状况如图 6 所示。年际流域出口 TN、TP 含量分布较为离散,二者的流失特征在总体趋势上较为一致。随着温度的升高,氮磷流失量递减。由拟合方程可发现,N 的递减趋势较 P 更大,即温度每升高 1℃,氮素流失减少 0.937 kg·hm⁻², 磷素流失减少 0.161 kg·hm⁻², 两者差值为 0.776 kg·hm⁻²。以上差异可能由于温度升高时氨氮在水中溶解度降低,部分 N 以气态形式逃离系统,造成

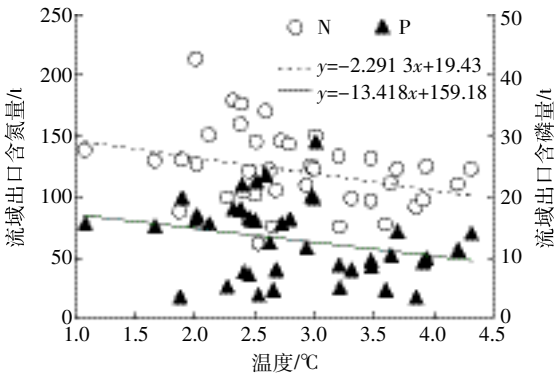


图 6 变化的温度条件下研究区年际总氮、总磷输出负荷

Figure 6 NPS nitrogen and phosphorus yield under different

土壤和径流中潜在的 N 含量减少。研究表明,温度升高增加了水稻植株中 N 的含量^[26],土壤中 N 含量相应减少,进而减少流失。另一方面,温度升高使 P 的有效性降低,迁移距离增加,更易留存于土壤中^[27],但总磷输出降低。结合气象变化图,温度较高年份降水量普遍较低,进而径流量和土壤侵蚀量减少^[6,24],表明降水量对磷素的影响更大,与相关性分析结果相符。

此外,基于温度、降水、氮磷输出三者的历史变化分析,多年温度升高,降水量减少的趋势下,氮磷输出在时间序列上依然呈现增加的趋势,可能的原因是流域近 40 年的土地利用方式变化,即氮磷输出受到农业开发、作物类型改变等人为因素的影响^[16,28]。而 Morales 等^[7]在加拿大尚普兰湖流域的研究发现,该地区的气候变化导致的无机氮输出增加是土地利用作用的 10 倍,可能由于不同地区对气候变化和人为因素改变的响应程度不同。

3 结论

(1)1975—2014 年间,研究区气温以 $0.132\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{ a}^{-1}$ 的微弱趋势波动上升。降水量自 20 世纪 80 年代初期开始波动下降,总减少量不超过 140 mm,且多年分布不均。全流域氮磷输出负荷分别呈现 $0.648\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $0.069\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ 的波动递增态势。

(2)氮磷输出负荷与降水量的正相关性显著,丰水年是氮磷输出的关键年份,输出负荷量分别是枯水年的 1.5 倍和 2.5 倍,且输出量增加的趋势随着降水量的增加而减缓。

(3)氮的输出量与温度显著负相关,磷的输出量与温度呈一定负相关关系,但并不显著。总体温度每升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,氮素流失减少 $0.937\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,磷素流失减少 $0.161\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

(4)除气象因素外,多年土地利用变化等人为因素对面源氮磷输出的影响可能更为强烈。未来在低温农区开展面源污染输出对气候变化相应的相关研究中,有必要考虑气候变化通过土地利用、耕作方式、作物类型等人为因素的响应,间接影响的面源污染输出量,对自然和人为因素的影响进行区分核算。

参考文献:

- [1] Panagopoulos Y, Makropoulos C, Mimikou M. Diffuse surface water pollution: Driving factors for different geoclimatic regions[J]. *Water Resources Management*, 2011, 25(14): 3635–3660.
- [2] Ouyang W, Song K, Wang X, et al. Non-point source pollution dynamics under long-term agricultural development and relationship with landscape dynamics[J]. *Ecological Indicators*, 2014, 45(1): 579–589.
- [3] 李明涛. 密云水库流域土地利用与气候变化对非点源氮、磷污染的影响研究[D]. 北京:首都师范大学, 2014.
LI Ming-tao. Impact of land use and climate change on non-point source nitrogen and phosphorus pollution in the Miyun Reservoir Watershed[D]. Beijing: Capital Normal University, 2014.
- [4] Novotny V. Diffuse pollution from agriculture: A worldwide outlook[J]. *Water Science and Technology*, 1999, 39(3): 1–13.
- [5] Bouraoui F, Grizzetti B, Granlund K, et al. Impact of climate change on the water cycle and nutrient losses in a Finnish catchment[J]. *Climatic Change*, 2004, 66(1/2): 109–126.
- [6] Wu L, Long T, Liu X, et al. Impacts of climate and land-use changes on the migration of non-point source nitrogen and phosphorus during rainfall-runoff in the Jialing River Watershed, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 475: 26–41.
- [7] Morales I, Cooper J, Amador J A, et al. Modeling nitrogen losses in conventional and advanced soil-based onsite wastewater treatment systems under current and changing climate conditions[J]. *PLoS One*, 2016, 11(6): 1–25.
- [8] 赵越, 卢诚, 谢阳村, 等. 未来气候变化影响下的流域面源污染负荷特征响应评估[J]. 水资源与水工程学报. 2016, 27(1): 40–45.
ZHAO Yue, LU Cheng, XIE Yang-cun, et al. Estimation of feature response of watershed nonpoint source pollution load under influence of future climate change[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2016, 27(1): 40–45.
- [9] Mitchell M J, Driscoll C T, Kahl J S, et al. Climatic control of nitrate loss from forested watersheds in the Northeast United States[J]. *Environmental Science & Technology*, 1996, 30(8): 2609–2612.
- [10] De Kock T, Boone M A, De Schryver T, et al. A pore-scale study of fracture dynamics in rock using X ray Micro CT under ambient freeze-thaw cycling[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(5): 2867–2874.
- [11] 周立青. 三江平原耕地资源变化及其对粮食生产的影响[D]. 长春: 中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2015.
ZHOU Li-qing. Changing of cultivated land resources and its effect on grain production in Sanjiang Plain[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology), 2015.
- [12] 侯越. 农业非点源污染的危害与防治措施[J]. 水资源与水工程学报, 2008(4): 103–106.
HOU Yue. Harms and prevention measures of the agricultural non-point source pollution[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2008(4): 103–106.
- [13] 沈涛, 刘良云, 马金峰, 等. 基于 L-THIA 模型的密云水库地区非点源污染空间分布特征[J]. 农业工程学报, 2007, 23(5): 62–68.
SHEN Tao, LIU Liang-yun, MA Jin-feng, et al. Spatial distribution characteristics of non-point pollution of Miyun Reservoir areas based on L-THIA model[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(5): 62–68.
- [14] 黄志霖, 田耀武, 肖文发, 等. 非点源污染模型 AnnAGNPS 在三峡库区林农复合小流域模拟效果评定[J]. 环境科学, 2009, 30(10): 2872–2878.

- HUANG Zhi-lin, TIAN Yao-wu, XIAO Wen-fa, et al. Nonpoint source pollution model, AnnAGNPS, assessment for a mixed forested watershed in Three Gorges Reservoir Area[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(10):2872-2878.
- [15] Cerucci M, Conrad J M. The use of binary optimization and hydrologic models to form Riparian buffers[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2003, 39(5):1167-1180.
- [16] Ouyang W, Huang H, Hao F, et al. Evaluating spatial interaction of soil property with non-point source pollution at watershed scale: The phosphorus indicator in Northeast China[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 432:412-421.
- [17] 欧阳威, 蔡冠清, 黄浩波, 等. 基于原位土壤观测的 SWAT 关键参数及模拟优化分析[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(8):1601-1608.
- OUYANG Wei, CAI Guan-qing, HUANG Hao-bo, et al. Optimization of key parameters for SWAT model based on field soil observation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(8):1601-1608.
- [18] Ouyang W, Xu X T, Hao Z C, et al. Effects of soil moisture content on upland nitrogen loss[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 546:71-80.
- [19] Panagopoulos Y, Makropoulos C, Baltas E, et al. SWAT parameterization for the identification of critical diffuse pollution source areas under data limitations[J]. *Ecological Modelling*, 2011, 222(19):3500-3512.
- [20] Moriasi D N, Arnold J G, Van Liew M W, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. *Transactions of the Asabe*, 2007, 50(3):885-900.
- [21] Wei P, Ouyang W, Hao F, et al. Combined impacts of precipitation and temperature on diffuse phosphorus pollution loading and critical source area identification in a freeze-thaw area[J]. *Science of the total Environment*, 2016, 553:607-616.
- [22] 周 晔, 郝芳华, 欧阳威, 等. 基于 MODIS 的三江平原农业扩张对农区气温的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(5):1036-1043.
- ZHOU Ye, HAO Fang-hua, OUYANG Wei, et al. The influence of farmland expansion using MODIS Data on temperature in an agricultural area of Sanjiang Plain[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(5):1036-1043.
- [23] Chiew F, McMahon T A. Modelling the impacts of climate change on Australian streamflow[J]. *Hydrological Processes*, 2002, 16(6SI):1235-1245.
- [24] Marshall E, Randhir T. Effect of climate change on watershed system: A regional analysis[J]. *Climatic Change*, 2008, 89(3/4):263-280.
- [25] 耿润哲, 王晓燕, 庞树江, 等. 潮河流域非点源污染控制关键因子识别及分区[J]. 中国环境科学, 2016, 36(4):1258-1267.
- GENG Run-zhe, WANG Xiao-yan, PANG Shu-jiang, et al. Identification of key factors and zonation for nonpoint source pollution control in Chaohe River watershed[J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(4):1258-1267.
- [26] 张立极, 潘根兴, 张旭辉, 等. 大气 CO₂ 浓度和温度升高对水稻植株碳氮吸收及分配的影响[J]. 土壤, 2015, 47(1):26-32.
- ZHANG Li-ji, PAN Gen-xing, ZHANG Xu-hui, et al. Effect of experimental CO₂ enrichment and warming on uptake and distribution of C and N in rice plant[J]. *Soils*, 2015, 47(1):26-32.
- [27] 陈小琴, 康 欧, 周健民, 等. 温度变化对磷在水稻土肥际微域中迁移和转化的影响[J]. 生态环境学报, 2014, 23(12):1915-1923.
- CHEN Xiao-qin, KANG Ou, ZHOU Jian-min, et al. Effects of temperature variation on migration and transformation of phosphorus in paddy soils[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(12):1915-1923.
- [28] Wang Z W, Yang S T, Zhao C S, et al. Assessment of non-point source total phosphorus pollution from different land use and soil types in a mid-high latitude region of China[J]. *WATER*, 2016, 8(11):505.