

# 农业小流域粮食产量稳定与水环境质量提高途径研究

曾昭霞<sup>1</sup>,刘孝利<sup>2,3</sup>,王克林<sup>1</sup>,曾馥平<sup>1</sup>,宋同清<sup>1</sup>,宋希娟<sup>1</sup>

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所,长沙 410125; 2. 中国科学院生态环境研究中心区域与城市生态国家重点实验室,北京 100085; 3. 湖南农业大学资源环境学院,长沙 410128)

**摘要:**实地调研了我国典型黑土区农业小流域粮食产量与施肥量的空间异质性,通过建立产量施肥量模型对施肥量进行空间上的优化调整,并选用 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 水文水环境模型进行流域水环境模拟.结果表明,施肥量在流域尺度上存在空间调整的可能和需要.在小流域粮食产量稳定目标下,通过施肥空间优化调整可减少小流域总施氮量的 1.88%,同时 SWAT 模型模拟结果显示,施肥空间优化调整可降低 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 营养盐输出分别为 9.7% 及 5.6%.

**关键词:**农业小流域;SWAT 模型;施肥空间调整

中图分类号:X592 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2010)08-1784-05

## Strategy of Grain Yield Stability Cooperated with Harmonious Water Environment Quality of Small Agricultural Watershed

ZENG Zhao-xia<sup>1</sup>, LIU Xiao-li<sup>2,3</sup>, WANG Ke-lin<sup>1</sup>, ZENG Fu-ping<sup>1</sup>, SONG Tong-qing<sup>1</sup>, SONG Xi-juan<sup>1</sup>

(1. Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. College of Resources & Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

**Abstract:** This paper investigated the spatial variability of the correlations between grain yields and fertilization quantity within the selected agricultural watershed, in the typical black soil region, and then optimized the fertilization quantity at different landscape farmlands within the watershed based on the regression equations. Study simulated the surface runoff water quality before and after fertilization spatial adjustment with the achieved parameters by Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model. The results showed that watershed scale fertilization adjustment is possible and necessary according to the spatial heterogeneity about fertilization and grain yields. Based on grain yield stability, spatial adjustment of fertilization reduced the whole watershed total N fertilization quantity by 1.88%, and the total non-point nutrients load reduction of  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  and  $\text{NO}_3^--\text{N}$  was 9.7%, 5.6%, respectively.

**Key words:** small agricultural watershed; Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model; fertilization spatial adjustment

近年来,化学肥料的不合理使用导致的面源污染造成了土壤质量的退化与水环境的污染<sup>[1,2]</sup>,以及地下水硝酸盐含量超标<sup>[3]</sup>.农业面源污染引起的水环境问题逐渐得到人们重视,并采取一系列措施控制日益严峻的面源污染<sup>[4]</sup>.然而,我国人口依然持续增长的势头与粮食需求压力的增强,耕地退化以及面源污染加剧的恶势没有得到有效缓解.因此,农业流域粮食产量稳定前提下的水环境质量提高途径研究具有重要的现实意义.

研究表明,流域尺度地形空间特征、土壤属性以及作物产量存在明显的空间异质性<sup>[5,6]</sup>,尤其在热量为农业生产主要限制因子的东北黑土区,这种空间差异更加显著<sup>[5]</sup>.实际农业生产中管理粗放现状忽略了这些差异并随之根据差异实施流域内不同景观位置农田的差异管理.虽然测土施肥的理念发展迅速,然而在大面积的实际农业生产中,测土施肥无论在技术还是实际操作上都存在一定的难度<sup>[6,7]</sup>.

本研究从流域尺度探索不同景观农田的合理施肥量,以产量稳定为前提,对施肥进行流域尺度上的空间优化调整,并借助在国内已经得到广泛成功应用的 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 水文模型<sup>[8]</sup>,评价施肥空间调整在减少流域农业面源污染负荷的生态效应.

### 1 研究区域与方法

#### 1.1 区域概况

研究选取黑龙江海倫市距中国科学院海倫生态实验站(北纬 N 47°26', 东经 E 126°38', 海拔 240 m) 4 km 处的吴家屯农业小流域(图 1),流域面积 12.9 km<sup>2</sup>.海倫黑土区属于北温带大陆季风气候(冬

收稿日期:2009-10-30;修订日期:2010-02-03

基金项目:中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB2-08);国家重点基础研究发展规划(973)项目(2006CB403208);中国科学院“西部之光”人才培养计划项目(0823045040)

作者简介:曾昭霞(1978~),女,博士,助理研究员,主要研究方向为生态学,E-mail: zengzhx78@163.com

季寒冷且冻期长,夏季高温多雨),年均降雨量 530 mm,平均日照时数 2 600 ~ 2 800 h,有效年均积温 ( $\geq 10^{\circ}\text{C}$ ) 2 450 $^{\circ}\text{C}$ ,无霜期 125 d 左右<sup>[2]</sup>.小流域为该区典型的自然人文地理景观,沟道密集,村舍位于流域的岗地.已有研究表明除了特殊干旱年份,流域坡顶岗地农田排水最好,产量最高,洼地则容易发生春涝产量最低,参照该区已有研究,将所研究小流域内农田划分为岗地、坡地、洼地三类明显的空间异质景观<sup>[5]</sup>.流域内主要作物为大豆和玉米(图 1),农户之间管理习惯差异较大,施肥量和施肥种类均缺乏科学指导.农户调查表明,大豆播种时一次性施复合肥约 250 ~ 350  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  (N%、 $\text{P}_2\text{O}_5\%$  分别为 20%、15%),玉米播种时施复合肥约 250 ~ 350  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,中期追肥为尿素约 250 ~ 350  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  (N:46%),施肥量因管理者经济条件不同存在明显差异.

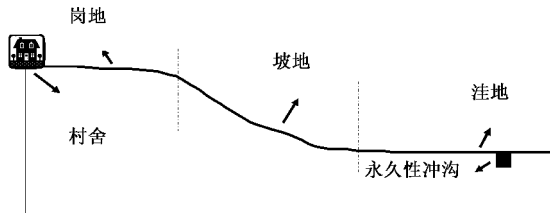


图 1 根据流域地形特征划分的三类典型农田景观  
Fig. 1 Farmland typical partition in our study small agricultural watershed

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 流域内施肥量与产量调查

研究选取了平水年份 2006 年,实地调研了流域内的三类典型景观农田(图 1)的氮肥施用量及大豆、玉米的产量.通过播种前流域内实地走访正在播种的农户记录施肥量和肥料种类及其有效氮素含量,以来源于务农经验丰富且于家中定量配肥农户的调研数据定为有效数据,并进行田块位置 GPS 定位和作物播种类别记录以保证收获时获得相应田块的产量数据.收获时,通过在这些定位的田块中间位置以“等边三角形”收割法取 3 个重复  $1\text{m}^2$  样本,通过计算获得该田块的单位面积作物产量.

通过建立回归模型优化流域不同景观农田的施氮肥量,依据回归模型实现流域粮食总产量的稳定目标,并将施氮量调整前后的参数输入 SWAT 模型进行水环境的情景模拟分析.

### 1.2.2 水环境模型研究

SWAT 模型是美国农业部农业研究所和德克萨斯农工大学联合开发的基于流域尺度的分布式水文模型,模型的数据输入界面友好,允许用户自己建立

土壤、肥料、植被覆盖等基于本研究区域的自定义数据库.在国内得到了很多成功的应用实例. SWAT 模型的基本原理就是由 700 多个方程、1 000 多个中间变量组成的综合模型体系.模型根据地面植被覆盖、土壤属性、坡度因子划分不同的具有水文意义的水文响应单元 HRU (hydrologic response units).

SWAT 是基于美国数据库开发的水文水环境模型,在国内应用时存在参数转换困难等问题<sup>[9,10]</sup>,因此本研究基于 Arcgis 软件利用流域的数字高程图提取等高线,并通过实地采样与实验室分析相结合的途径获取土壤理化参数,自建土壤属性图(图 2),通过 2006 年播种前对流域内岗地、坡地、洼地三类典型的景观单元进行全流域范围内土样采集,采集点位分布见图 2.岗地、坡地、洼地分别采集了 17、13、12 个土壤样本,主要测定土壤的颗粒组分、有机质含量、pH 值、速效氮含量 ( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$  含量)等,模型输入参数为样本测定的平均值,土壤水力参数借助已得到广泛应用的 Saxton 模型<sup>[11-13]</sup>通过输入测定的土壤颗粒组分参数生成,降雨参数为海伦生态实验站气象站的日降雨记录数据(图 3).

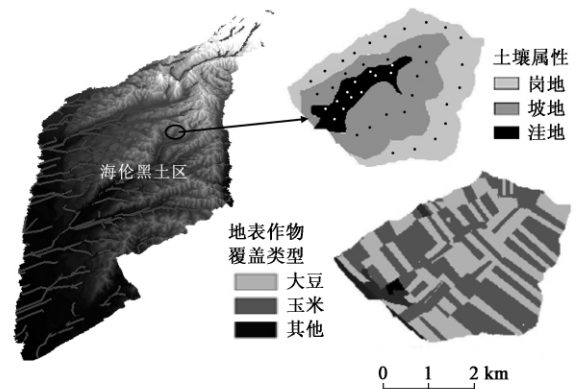


图 2 实验流域选择及 SWAT 模型参数准备  
Fig. 2 Agricultural watershed selection and input data preparation for SWAT model

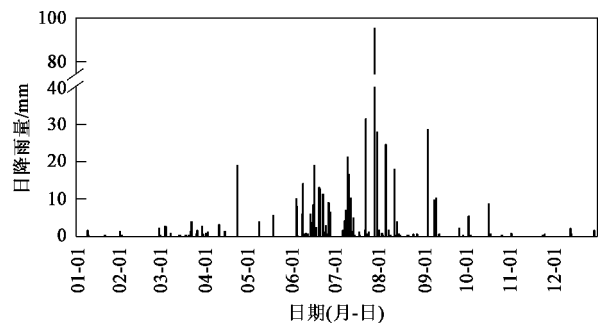


图 3 2006 年日降雨分布  
Fig. 3 Daily rainfall distribution of 2006

## 2 结果与分析

### 2.1 小流域农田施肥与作物产量的空间差异

2006 年播种期,对流域不同景观农田的施氮量和产量进行实地调研,表 1 结果表明,流域内岗地、坡地、洼地三类典型景观大豆、玉米单位面积施氮量没有差异,但岗地的大豆和玉米的产量和氮肥的产

量效益最高,分别为  $(2\ 141 \pm 135)$ 、 $(29.3 \pm 2.45)$   $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和  $(6\ 178 \pm 768)$ 、 $(34.7 \pm 3.90)$   $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,洼地的大豆和玉米产量最低,坡地作物产量较洼地为高,但较岗地低.农户调查结果显示,目前农田管理者并未考虑产量的空间差异而进行施肥调整,肥料的低效利用造成严重的面源污染.可见,流域内不同景观农田施氮量存在空间调节的可能和必要.

表 1 流域内不同景观地形农田的施氮量与产量的空间差异

Table 1 Spatial heterogeneity between nitrogen fertilizer application and grain yield in the selected watershed

地形	主要作物	样本量	氮肥用量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	产量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	氮肥效率 <sup>1)</sup> / $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$
岗地	大豆	18	$76.5 \pm 7.2$	$2\ 141 \pm 135$	$29.3 \pm 2.45$
	玉米	18	$191.6 \pm 21.9$	$6\ 178 \pm 768$	$34.7 \pm 3.90$
坡地	大豆	19	$75.5 \pm 6.8$	$2\ 099 \pm 92$	$28.8 \pm 1.78$
	玉米	21	$186.3 \pm 18.4$	$6\ 093 \pm 729$	$33.5 \pm 4.86$
洼地	大豆	16	$73.1 \pm 7.7$	$2\ 094 \pm 133$	$27.9 \pm 3.01$
	玉米	18	$189.7 \pm 17.6$	$5\ 700 \pm 725$	$31.5 \pm 2.15$

1) 每 kg 氮肥用量所产出的粮食 kg 数

图 4 结果表明,随着施氮量的增加,大豆 [图 4 (a)]和玉米 [图 4 (b)]产量在达到一定数值后,如

果继续追求产量的提高,则需以指数增长的氮肥用量为代价.

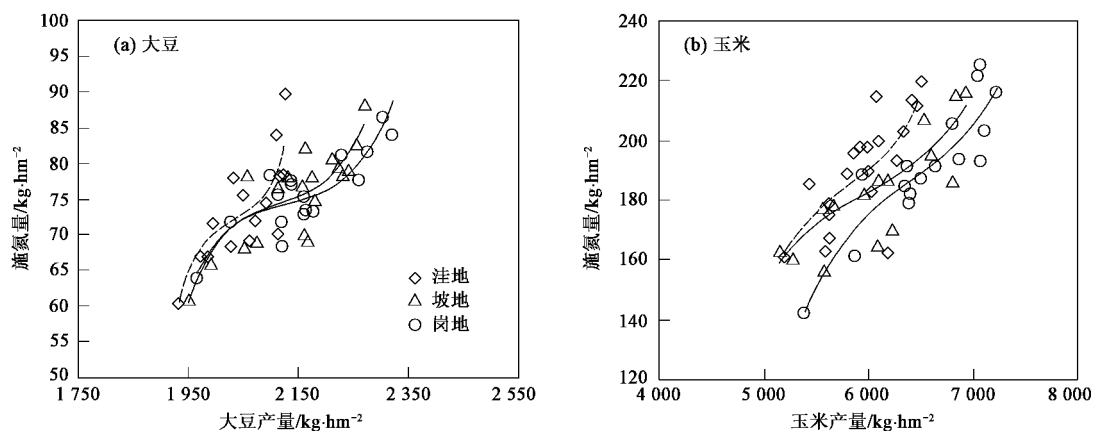


图 4 施氮量与大豆、玉米产量

Fig. 4 Correlations between Nitrogen fertilizer application amount with soybean and maize yields

### 2.2 流域农田施肥量的空间优化调整

洼地农田施肥量的降低调整必然导致流域作物总产量在一定程度上的降低,根据表 1 和图 4 所示结果,岗地农田的产量和氮肥利用效率和增产潜力最高.因此,为了确保流域粮食总产量的稳定目标,提高氮肥投入的利用效益,在调低洼地和坡地农田施氮量的同时需要适当增加岗地农田作物的施氮量.本研究对流域三类景观农田(岗地、坡地、洼地)的产量和施肥量进行了非线性回归拟合,结果如表 2 所示.拟合效果最差的是洼地玉米产量与施氮量的回归方程,但检验表明方程可用.

根据图 4 所示结果,优先降低洼地、坡地作物的施氮量,调整原则根据图 4 中作物产量增加时施氮量呈指数增长前的施肥量视为较合理的施氮量.调整后的施氮量根据表 2 回归拟合的方程计算作物产量,在流域总产量稳定目标下,提高岗地作物的施氮量,单位面积施氮量初步调整结果如表 3 所示.

如表 4 所示,在产量稳定的目标下,对流域内不同地形农田施氮量空间优化调整后降低流域内总施氮量的 1.88%,即可节约小流域氮肥施用量  $3.15 \times 10^3$  kg,且洼地农田施氮量的降低调整造成的产量下降不明显,岗地增加氮肥投入的增产效果较好(表 3 和表 4).

表 2 施氮量(y)与产量(x)的回归方程

Table 2 Regression equations about grain yields (y) and fertilization amount (x)

作物类型	景观位置	回归方程	F	p
大豆	岗地	$y = -0.011x^3 + 2.3879x^2 - 158.29x + 5228$ ( $R^2 = 0.73$ )	33.224	0.000
	坡地	$y = 0.0245x^3 - 5.7286x^2 + 453.29x - 9962.6$ ( $R^2 = 0.69$ )	20.360	0.000
	洼地	$y = 0.0038x^3 - 1.0957x^2 + 105.72x - 1306$ ( $R^2 = 0.67$ )	16.875	0.000
玉米	岗地	$y = -0.0057x^3 + 3.0459x^2 - 515.08x + 33403$ ( $R^2 = 0.82$ )	47.329	0.000
	坡地	$y = 0.0154x^3 - 8.5797x^2 + 1610.1x - 95429$ ( $R^2 = 0.62$ )	10.450	0.001
	洼地	$y = -0.005x^3 + 2.9836x^2 - 577.78x + 42061$ ( $R^2 = 0.56$ )	5.513	0.032

表 3 流域内施肥空间优化调整后施氮量

Table 3 Spatially optimal adjusted nitrogen fertilizer application amount within agricultural watershed

景观位置	作物	施氮量 /kg·hm <sup>-2</sup>
岗地	大豆	77
	玉米	202
坡地	大豆	70
	玉米	180
洼地	大豆	70
	玉米	180

以及日降雨数据输入 SWAT 模型进行情景模拟分析. 流域可溶性营养盐流失模拟结果如图 3 所示,在流域总产量稳定的前提下(表 4),对流域不同景观农田的施氮量进行空间优化调整后,在节约氮肥用量的同时一定程度上降低了 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 营养盐的面源流失(图 5).

研究还对施肥空间优化调整前后流域出口的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 营养盐流失总量进行了统计分析. 统计结果发现,实施施肥空间优化调整管理后,一定程度上降低了流域出口面源污染物的总负荷,降低 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的面源流失量分别为 9.7% 和 5.6%.

### 2.3 施肥空间调整前后流域面源负荷比较

将流域内施肥空间优化调整前后的施氮量参数

表 4 施肥空间优化调整前后流域总产量和施氮量的比较

Table 4 Comparison of watershed total grain yield and N fertilization amount before and after spatial optimization adjustment

景观位置	作物	面积 /hm <sup>2</sup>	调整前施氮量 × 10 <sup>3</sup> /kg	产量 × 10 <sup>3</sup> /kg	调整后施氮量 × 10 <sup>3</sup> /kg	产量 × 10 <sup>3</sup> /kg
岗地	大豆	325.2	24.87	696.26	25.04	707.32
	玉米	270.9	51.90	1673.62	54.18	1794.17
坡地	大豆	285.1	21.53	598.43	18.96	594.43
	玉米	301.5	56.17	1837.04	54.27	1798.05
洼地	大豆	58.4	4.27	122.29	4.09	115.47
	玉米	48.6	9.22	277.02	8.27	269.69
总量		1289.7	167.96	5204.66	164.81	5279.13
施肥调整前后对比 /%					-1.88	1.43

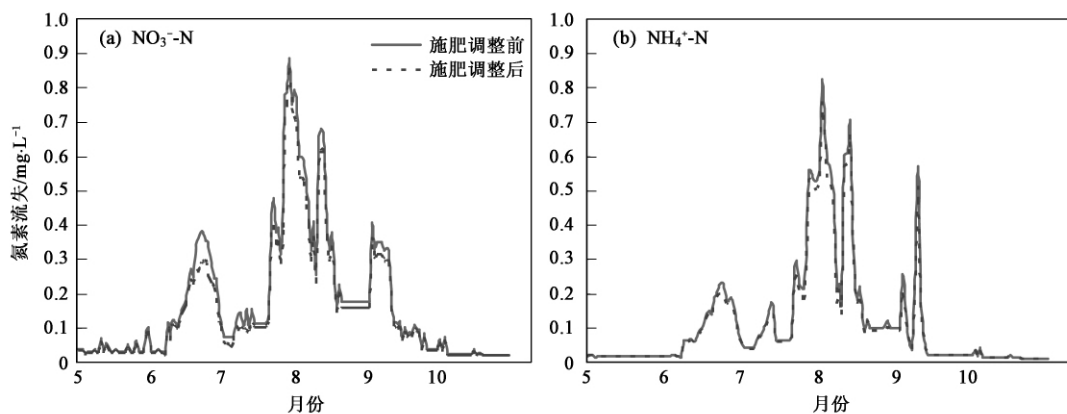


图 5 施肥调整前后流域出口营养盐输出对比分析

Fig. 5 Comparison of nutrients loads at the outlet of watershed before and after fertilization regulation

### 3 讨论

近年来,黑土资源的过度开垦以及化学肥料投入的大量增加已经严重威胁该区农业的可持续发展和水环境安全<sup>[3,14,15]</sup>,地下水硝酸盐含量超标,氮肥的过量投入与日趋严峻的面源污染已经威胁到当地居民的饮用水安全和身心健康<sup>[3]</sup>。

测土施肥的理念在大面积的实际农业生产中的应用存在技术和操作上的困难<sup>[6,16]</sup>。同时,同位素示踪技术在研究东北漫岗地形黑土区的土壤空间随降雨地表径流的再分配规律的结果中显示,土壤颗粒和营养物在流域洼地表现明显的沉积,岗地侵蚀较轻,坡地较为严重,洼地的土壤养分含量最高<sup>[17]</sup>,更加表明了黑土区农业小流域施肥存在空间优化调整的可能和需要。本研究结果显示,降低洼地农田的施氮量对产量的降低不明显(图4和表4)。

通过 SWAT 水文水环境模型模拟发现,流域尺度施肥空间优化调整后,一定程度上降低了流域出口的 N 负荷。相比测土施肥技术,流域尺度上的施肥空间优化调整管理方案则更加实际可行,实际操作性强。随着人口持续增长,粮食生产压力渐增,化学肥料的投入的持续增加并没有带来相应的增产效益<sup>[14,18]</sup>,因此水环境友好条件下的粮食产量稳定研究成为农业可持续发展研究的重点和挑战。本研究通过 SWAT 模型模拟表明,在流域总产量稳定前提下,流域尺度农田施肥的空间优化调整可降低流域的氮肥用量、农业面源污染的输出 N 负荷(表4和图5)。

### 4 结论

黑土区农业小流域尺度农田氮肥用量在空间上不合理,存在空间优化调整的可能和需要。在产量稳定前提下,流域尺度施肥的空间优化调整措施,可降低流域速效氮营养盐的流失,在一定程度上可以缓解黑土区追求产量时面源污染加重的矛盾,并且产量稳定下的流域管理措施更具有实际的意义。

### 参考文献:

- [1] 胡刚,伍永秋,刘宝元,等. 东北漫岗黑土区切沟侵蚀发育特征[J]. 地理学报, 2007, 62(11):1165-1173.
- [2] 范昊明,蔡强国,王红闪. 中国东北黑土区土壤侵蚀环境[J]. 水土保持学报, 2004, 18(2):66-70.
- [3] 赵新峰,杨丽蓉,施茜,等. 东北海伦地区农村地下水硝态氮污染特征及其影响因素分析[J]. 环境科学, 2008, 29(11):2993-2998.
- [4] Walter M F, Steenhuis T S, Haith D A. Nonpoint source pollution control by soil and water conservation practices [J]. T Asae, 1979, 22:834-840.
- [5] 魏建兵,肖笃宁,李秀珍,等. 东北黑土区小流域农业景观结构与土壤侵蚀的关系[J]. 生态学报, 2006, 26:2608-2615.
- [6] 杨印生,安秀峰,郭鸿鹏. 吉林省实施精确农业的可行性定量分析[J]. 农机化研究, 2004, 2:63-66.
- [7] 吴景才,吴萍,张丙友,等. 丘陵漫岗黑土侵蚀区小流域综合治理开发标准的探讨[J]. 中国水土保持, 1996, 5:41-44.
- [8] 张银辉. SWAT 模型及其应用研究进展[J]. 地理科学进展, 2005, 24(5):121-130.
- [9] 宋艳华,马金辉. SWAT 模型在陇西黄土高原地区的适用性研究[J]. 干旱区地理, 2007, 30(6):933-938.
- [10] 赵串串,张荔,杨晓阳,等. 国内外流域水文模型应用进展[J]. 环境科学与管理, 2007, 32(10):17-21.
- [11] Saxton K E, Rawls W J, Romberger J S, et al. Estimating Generalized Soil-water Characteristics from Texture [J]. Soil Sci Soc Am J, 1986, 50:1031-1036.
- [12] 刘建立,徐绍辉,刘慧. 估计土壤水分特征曲线的间接方法研究进展[J]. 水利学报, 2004, 2:68-76.
- [13] 庞靖鹏,徐宗学,刘昌明. SWAT 模型中天气发生器与数据库构建及其验证[J]. 水文, 2007, 27(5):25-30.
- [14] 马岩,郑海峰,赵新峰,等. 黑龙江海伦市粮食产量稳定性影响因素分析[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(4):215-223.
- [15] McDowell R W, Sharpley A N, Condon L M, et al. Processes controlling soil phosphorus release to runoff and implications for agricultural management [J]. Nutr Cycl Agroecosys, 2001, 59(3):269-284.
- [16] 杨益花. 我国测土配方施肥存在问题及建议[J]. 安徽农学通报, 2009, 15(1):52-53.
- [17] 方华军,杨学明,张晓平,等. <sup>137</sup>Cs 示踪技术研究坡耕地黑土侵蚀和沉积特征[J]. 生态学报, 2005, 25(6):1376-1382.
- [18] 李忠芳,徐明岗,张会民,等. 长期施肥下中国主要粮食作物产量的变化[J]. 中国农业科学, 2009, 42(7):2407-2414.