

我国农田总氮流失影响因素分析

董蓓蓓^{1,2,3}, 马淑花^{2*}, 曹宏斌^{1,2}, 张 懿^{1,2}

(1.中国科学院过程工程研究所过程污染控制环境工程研究中心, 北京 100190; 2.中国科学院过程工程研究所湿法冶金清洁生产
技术国家工程实验室, 北京 100190; 3.中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要:利用第一次全国农业污染源普查的 70 个样本数据,对农田非点源污染总氮(TN)流失系数与 6 个影响因素间的关系进行
相关和回归分析。结果表明,土地利用方式 X_3 、土壤质地 X_4 、施氮量 X_5 、年降雨量 X_6 4 个因素对农田 TN 流失系数有显著影响。由标
准化回归系数得知,各因素对流失系数影响的大小顺序为 $X_6 > X_5 > X_3 > X_4$ 。在此基础上所建立的我国农田 TN 流失系数的回归方程为
 $Y = -5.3 + 0.28X_6 + 0.017X_5 + 4.563X_3 + 0.088X_4$,通过 16 个文献数据对该模型进行验证,结果显示该模型具有很好的预测能力,可用于我
国不同地域农田 TN 流失系数的估算。

关键词:农田;总氮流失;非点源污染;相关性分析;回归模型

中图分类号:X522 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)10-2040-06

Investigations into the Farmland Total Nitrogen Loss in China

DONG Bei-bei^{1,2,3}, MA Shu-hua^{2*}, CAO Hong-bin^{1,2}, ZHANG Yi^{1,2}

(1. Research Center for Industrial Pollution Control, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. National Engineering Laboratory for Hydrometallurgical Cleaner Production Technology, Institute of Process Engineering, Chinese Acade-
my of Sciences, Beijing 100190, China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The determination of total nitrogen(TN) loss coefficient is of very importance for evaluating the impact of non-point source pollu-
tion on the agricultural environment. On the basis of seventy data of the samples collected from First National Census of Agricultural Pollution
Sources, a mathematical model based on SPSS(Statistical Product and Service Solutions) software was built, which was used to analyze the
impact of six influential factors, in term of terrain slope(X_1), type of farmland(terrace field or not, X_2), land utilization pattern(X_3), soil tex-
ture(X_4), nitrogen application level(X_5), and annual rainfall(X_6), on the TN loss coefficient of agricultural non-point source pollution. The
correlation and regression demonstrated that X_3 , X_4 , X_5 and X_6 have significant impact on the TN loss coefficient, with influence degree de-
creasing as $X_6 > X_5 > X_3 > X_4$ based on the comparison among the standard regression coefficients. On the other hand, the impact of X_1 and X_2 on
the TN loss coefficient could be neglected. Further, a multiple linear equation, with the form of $Y = 4.563X_3 + 0.088X_4 + 0.017X_5 + 0.28X_6 - 5.3$,
was obtained to precisely calculate the TN loss coefficient, which was validated using the data collected from 16 references, confirming that
the regression model established in this work was suitable for predicting the TN loss from farmland due to the non-point source pollution in
different regions of China.

Keywords: farmland; total nitrogen loss; non-point source pollution; correlation analysis; regression model

随着近年来城市和工业点源污染控制工程的实施,非点源污染在污染来源中的比重逐渐增大,其中
农业面源污染已成为江河湖海富营养化和水环境恶

化的主要原因之一^[1-3],尤其是农田氮素的流失已经
引起一系列的环境问题^[4-5],对农田氮素污染的防治
成为当务之急。总氮(TN)排放负荷的精确估算是进
行面源污染防治的基础,近年来国内外研究者针对
农田非点源污染的排放规律及排放负荷开展了大量
研究^[6-12],提出了模型计算法和排污系数法等预测非
点源负荷的数学模型。模型计算法精确度较高,但是
涉及参数较多,计算条件苛刻,适用性差。相对而言,
排污系数法简单、对数据要求相对较低、可操作性强,

收稿日期:2011-02-17

基金项目:中国工程院“我国重点湖泊富营养化控制及其流域经济协
调发展战略研究”咨询项目

作者简介:董蓓蓓(1984—),女,山东潍坊人,硕士研究生,主要从事区
域发展模式对湖泊富营养化的影响研究。

E-mail:dbb109@163.com

* 责任作者:马淑花 E-mail:shma@home.ipe.ac.cn

特别适合无实验条件或资料不足的情况,因而得到了广泛应用^[13-22]。但实践表明,TN 流失系数的不确定性对准确估计农田 TN 排放带来了较大困难,减小排放系数的不确定性对于提高农田 TN 排放量的计算精度具有重要意义。已有研究表明,环境因素对农田 TN 流失影响很大^[23-38],但均是针对单一因素的考察,各影响因素的权重尚不明确,导致排污系数法准确性差。因此,有必要开展 TN 流失系数与各影响因子的相关性研究,探索影响 TN 流失的主要因素,各因素与流失系数之间的定量关系,为 TN 污染排放系数选取提供理论指导。

本文在对《第一次全国污染源普查——农业污染源:肥料流失系数手册》(2009 年)进行详细数据分析的基础上,运用 SPSS 软件考察了农田 TN 流失系数与各影响因素之间的相关关系,建立流失系数与各因素之间的多元线性回归方程,并和文献报道的数据进行比较。

1 材料与方法

1.1 数据来源与处理

样本数据来源于国务院第一次全国污染源普查领导小组办公室 2009 年发布的《第一次全国污染源普查——农业污染源:肥料流失系数手册》。数据测算以我国农业种植区划和优势农产品区划为依据,在综合考虑肥料污染的发生规律和主要影响因素(如地形、气候、土壤、作物种类与布局、种植制度、耕作方式、灌排方式等)的基础上,主要依据地形和气候特征,将全国种植业污染源划分为六大区域,包括南方山地丘陵区、黄淮海半湿润平原区、南方湿润平原区、北方高原山地区和东北半湿润平原区。在主要农作物种植区域选择典型种植制度和具有代表性地形地貌的农田,70 个样本数据均通过实地监测来获取。

本文所有数据均源于此或在此基础上根据计算分析需要进行转换。

1.2 模型变量选择与说明

选取农田 TN 流失系数作为模型因变量,单位为 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。基于影响因素的完备性、代表性,数据的可

得性等原则,自变量选取如下:

(1)地形坡度 X_1 :分平地、缓坡地和陡坡地 3 种。平地取值为 5° ,缓坡地取值为 10° ,陡坡地取值为 15° 。

(2)是否梯田 X_2 :梯田指在坡地上分段沿等高线建造的阶梯式农田。梯田取值为 1,非梯田取值为 0。

(3)土地利用方式 X_3 :按照土地耕作类型分旱田和水田。旱田取值为 0,水田取值为 1。

(4)土壤质地 X_4 :根据前苏联卡庆斯基土壤分类法^[40],用土壤中粘粒的含量来表征样本中各点的土壤质地。

(5)施氮量 X_5 :单位面积农田氮肥的年施用量,以有效成分 N 计,单位 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

(6)年降雨量 X_6 :监测区域年均降雨量,mm。为计算方便,取降雨量的 1/100。

1.3 统计分析方法

首先在 Excel 上建立数据库,然后用 SPSS18 软件进行统计分析^[41]。分析各因素与 TN 流失系数的相关关系,并进行多元线性回归分析。

2 结果与讨论

2.1 农田 TN 流失系数与各因素的相关程度

变量间的相关关系通常采用 Pearson 简单相关系数 r 来表征: $|r|$ 越大表示两变量相关性越强。农田 TN 流失系数与 7 个影响因素之间的相关关系分析结果见表 1。

可以看出,除坡度外,TN 流失系数与其余因素之间均具有显著的正相关关系。相关系数越大,表明其对农田 TN 流失的影响程度越大。影响程度由大到小依次为年降雨量、施氮量、土地利用方式、土壤质地、是否梯田。

年降雨量和施氮量是 TN 流失的两个最主要的影响因子^[33]。年降雨量越大,施氮量越大,农田 TN 流失量越大,与相关研究结果相符^[33-35]。

土地利用方式不同,径流中 TN 流失量也不同,水田流失大于旱地,与于兴修等^[36]的研究相吻合。

土壤质地与流失量正相关,即土壤中粘粒越多,

表 1 农田总氮流失系数影响因素表

Table 1 Factors impacting on the coefficient of farmland total nitrogen loss

7 项因素	坡度	梯田	土地利用方式	土壤质地	施氮量	年降雨量
Pearson Correlation	-0.112	0.294*	0.469**	0.434**	0.554**	0.621**
TN 流失系数 Sig.(2-tailed)	0.354	0.013	0.000	0.000	0.000	0.000
N	70	70	70	70	70	70

TN 越易流失。这可能是由于土壤表土越粘重,入渗系数越小,相同的雨量到达地表产生径流的时间越短,产生的径流量越大,表土颗粒态氮和缓效态氮汇入径流中,导致土壤中的氮素溶解量增多,使得径流中氮增加^[37]。

坡度相关性差,可能是由于样本地形坡度范围集中(5°~15°),而氮流失在中等坡度(20°)时最大^[38],其他坡度值时影响较小所致。

2.2 回归模型及其检验

6 个自变量对因变量的影响不一定都有显著意义,因此需要根据各自变量对因变量的贡献大小来进行变量的筛选,从而求出精炼稳定的回归方程。本文采用 SPSS 软件自带的自变量逐步回归方式进行变量的筛选,在设置的 6 个变量中,只有 X_3 、 X_4 、 X_5 、 X_6 4 个自变量被选入多元回归模型。根据表 2 中的非标准化系数 B 值(即 β 值),我国不同农田 TN 流失系数的函数模型为:

$$Y=-5.3+0.28X_6+0.017X_5+4.563X_3+0.088X_4 \quad (n=70, R=0.797)$$

方程的回归系数表明这 4 个因素对 TN 流失影响的大小顺序为 $X_6>X_3>X_5>X_4$, 由于方程中的偏回归系数受单位的干扰,要比较各自变量对因变量 Y 的作用的大小,需要用标准化回归系数,由表 2 可以看出,标准化回归系数的大小顺序为 $X_6>X_5>X_3>X_4$ 。

模型的各项检验指标见表 3。模型的拟合优度指标为 $R^2=0.635$, 即 TN 流失量 63.5%的变动可以被该模型解释。理论上讲,对时间序列数据,拟合优度达到 0.9 以上很正常。但是对于截面数据而言,其数值达到 0.5 即可视为理想^[41]。模型 F 检验值等于 28.27。根据模型的样本数量及自变量个数, $F_{0.05}(4, 65)=2.51$ 。可知 $F>F_{0.05}(4, 65)$ 。 t 统计量数据中的最小值为 3.061, 而根据模型的数据量及自变量个数, $T_{0.05}(65)=1.671$ 。因此, $|t|>t_{\alpha}(n-p-1)$, 即 $3.061>1.671$, 从而拒绝 H_{20}

假设;同时显著性概率 Sig 皆小于 0.05,因此在 0.05 的显著性水平下都通过了 t 检验,可以认为所得函数模型的回归系数是非常显著的。模型中所有变量的 VIF 值均小于 10,所有变量容忍度(*Tolerance*)均接近于 1,说明模型变量间不存在多重共线性。模型标准化残差的绝对值最大为 2.305,均落在(-3,3)的标准区间内,说明数据样本无奇异值。

以上分析表明模型通过了各种检验,说明本方程在统计学上是有意义的。

表 3 模型检验参数

Table 3 Parameters used for model validation

<i>R</i>	<i>R</i> ²	<i>F</i>	Std. Residual
0.797	0.635	28.270	2.305

2.3 模型预测能力的检验

为了检验模型的精确度以及能否用于实际预测,本文将近年来文献中报道的我国各地农田 TN 流失系数与模型预测值进行比较,结果见表 4。

由表 4 可知,除 4 个样本误差在 25%左右外,其余计算误差小于 20%,因此该模型可用于我国不同地区农田总氮流失系数的预测。

3 结论

本文选取第一次全国农业面源污染普查数据,应用 SPSS 软件对农田总氮流失系数和各影响因素之间的关系进行相关回归分析。结果表明,各因素对总氮流失系数的影响程度由大到小依次为年降雨量、施氮量、土地利用方式、土壤质地。并通过回归分析得到农田总氮流失系数的多元线性回归方程: $Y=-5.3+0.28X_6+0.017X_5+4.563X_3+0.088X_4$ 。

该方程具有统计学意义,并且预测值与实测值之间的误差基本小于 30%,实用性好。但由于可获得的定量数据比较少,数据不稳定,尤其地形坡度范围相对集中,可能会对研究结果产生负面影响。

表 2 模型方程回归参数表

Table 2 Parameters used for establishing the regression equation

Factors	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	<i>T</i>	<i>Sig.</i>	Collinearity Statistics	
	<i>B</i>	Std. Error	<i>Beta</i>			<i>Tolerance</i>	<i>VIF</i>
(Constant)	-5.300	1.732		-3.061	0.003		
年降雨量	0.280	0.061	0.383	4.605	0.000	0.814	1.229
施氮量	0.017	0.004	0.337	4.144	0.000	0.848	1.179
土地利用方式	4.563	1.289	0.280	3.539	0.001	0.900	1.111
土壤质地	0.088	0.038	0.183	2.281	0.026	0.874	1.144

表 4 近几年文献数据对模型的验证

Table 4 Model Validation based on the data collected from recent references

地域	降雨量/mm	土壤质地/%	施氮量/kg·hm ⁻²	土地利用方式	TN 流失系数/kg·hm ⁻²		偏差/%
					预测值	文献值	
四川涪陵	1 100	56	349.5	0	8.82	11.45 ^[13]	22.9
广东新田	2 000	38	913.5	0	19.35	16.83 ^[14]	-15.0
湖北荆州	1 200	55	511.5	0	11.78	11.21 ^[15]	-5.10
上海郊区	1 200	28	436.5	0	8.07	10.65 ^[16]	24.2
江苏宜兴	948	75	463.5	0	12.03	11.81 ^[17]	-1.90
天目湖流域	1 169	36	561.0	0	10.82	10.40 ^[18]	-4.00
密云水库	606	25	250.1	0	2.93	2.97 ^[19]	1.50
苏南太湖	1 340	55	345.0	0	9.35	11.60 ^[33]	19.4
太湖东山镇	1 139	15	625.5	1	14.49	20.40 ^[20]	29.0
江苏宜兴	948	75	463.5	1	16.59	19.77 ^[17]	16.1
上海郊区	1 200	28	436.5	1	12.63	12.45 ^[16]	-1.40
广东从化	2 000	38	913.5	1	23.91	20.96 ^[14]	-14.1
天目湖流域	1 169	36	561.0	1	15.38	18.80 ^[18]	18.2
浙江宁海	1 655	55	288.0	1	13.83	20.00 ^[21]	30.8
安徽梅村	1 289	35	360.0	1	12.21	15.00 ^[31]	18.6
东江流域	1 875	35	913.5	1	20.15	25.50 ^[22]	21.0

参考文献:

[1] Hollinger E, Cornish P S, Baginska B, et al. Farm-scale storm water losses of sediment and nutrients from a market garden near Sydney, Australia[J]. *Agricultural Water Management*, 2001, 47:227-241.

[2] 程 波, 张 泽, 陈 凌, 等. 太湖水体富营养化与流域农业面源污染的控制[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(增刊):118-124.

CHENG Bo, ZHANG Ze, CHEN Ling, et al. Eutrophication of Taihu Lake and pollution from agricultural non-point sources in Lake Taihu basin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(Suppl):118-124.

[3] 全为民, 严力蛟. 农业面源污染对水体富营养化的影响及其防治措施[J]. 生态学报, 2002, 22(3):291-299.

QUAN Wei-min, YAN Li-jiao. Effects of agricultural non-point source pollution on eutrophication of water body and its control measure[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(3):291-299.

[4] Smith K A, Jackson D R, Pepper T J. Nutrient losses by surface runoff following the application of organic manures to arable land: Nitrogen[J]. *Environmental Pollution*, 2001, 112:41-51.

[5] 陈志凡, 赵 焱. 基于氮素流失对非点源污染研究的述评[J]. 水土保持研究, 2006, 13(4):49-53.

CHEN Zhi-fan, ZHAO Ye. Study Progress on non-point source pollution based on loss of nitrogen[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, 13(4):49-53.

[6] Ng Kee Kwong K F, Bholah A, Volcy L, et al. Nitrogen and phosphorus transport by surface runoff from a slity clay loam soil under sugarcane in the humid tropical environment of Mauritius[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2002, 91:147-157.

[7] Goolsby D A, Battaglin W A, Aulenbach B T, et al. Nitrogenflux and sources in the Mississippi River basin[J]. *The Science of the Total Environment*, 2000, 248:75-86.

[8] Eileen Chen, Scott Mackay D. Effects of distribution-based parameter aggregation on a spatially distributed agricultural nonpoint source pollution model[J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 295:211-224.

[9] Lewis D R, McGechan M B, McTaggart I P. Simulating field-scale nitrogen management scenarios involving fertilizer and slurry applications[J]. *Agricultural Systems*, 2003, 76:159-180.

[10] 胡远安, 程声通, 贾海峰. 芦溪流域非点源污染物流失的一般规律[J]. 环境科学, 2004, 25(6):101-112.

HU Yuan-an, CHENG Sheng-tong, JIA Hai-feng. Regular pattern of non-point source pollutants losses in Luxi watershed[J]. *Environmental Science*, 2004, 25(6):101-112.

[11] 张荣保, 姚 琪, 计 勇, 等. 太湖地区典型小流域非点源污染物流失规律:以宜兴梅林小流域为例[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(1):94-98.

ZHANG Rong-bao, YAO Qi, JI Yong, et al. A study on law of non-point source pollutants losses in a typical small watershed of Taihu basin: A case study at Meilin watershed in Yixing city of Jiangsu province[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2005, 14(1):94-98.

[12] 毛战坡, 尹澄清, 王雨春, 等. 污染物在农田溪流生态系统中的动态变化[J]. 生态学报, 2003, 23(12):2614-2623.

MAO Zhan-po, YIN Cheng-qing, WANG Yu-chun, et al. A study on nitrogen transport in a farmland stream in Liuchahe watershed [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(12):2614-2623.

[13] 陈西平, 黄时达. 涪陵地区农田径流污染输出负荷定量研究[J]. 环境科学, 1990, 12(3):75-79.

CHEN Xi-ping, HUANG Shi-da. Quantitative analyses on the load of

- farmland runoff pollution in Fuling[J]. *Environmental Science*, 1990, 12(3):75-79.
- [14] 程 炯, 邓南荣, 蔡雪娇, 等. 不同源类型农业非点源负荷特征研究:以新田小流域为例[J]. 生态环境, 2008, 17(6):2159-2162.
CHENG Jiong, DENG Nan-rong, CAI Xue-jiao, et al. Load characteristic of agricultural non-point source pollution based on various source-types: A case study on Xintian watershed[J]. *Ecological Environment*, 2008, 17(6):2159-2162.
- [15] 帅方敏, 王新生, 陈红兵, 等. 长湖流域非点源污染现状分析[J]. 云南地理环境研究, 2007, 19(5):118-122.
SHUAI Fang-min, WANG Xin-sheng, CHEN Hong-bing, et al. Analysis of non-point pollution of current Changhu drainage-area[J]. *Yunnan Geographic Environment Research*, 2007, 19(5):118-122.
- [16] 张大第, 张晓红, 章家骥, 等. 上海市郊区非点源污染综合调查评价[J]. 上海农业学报, 1997, 13(1):31-36.
ZHANG Da-di, ZHANG Xiao-hong, ZHANG Jia-qi, et al. Integrated research and evaluation on nonpoint source pollution in Shanghai suburbs[J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 1997, 13(1):31-36.
- [17] 段 亮, 段增强, 夏四清. 太湖旱地非点源污染定量化研究[J]. 水土保持通报, 2006, 26(6):40-43.
DUAN Liang, DUAN Zeng-qiang, XIA Si-qing. Quantification of non-point pollution from uplands in Taihu Lake catchment[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2006, 26(6):40-43.
- [18] 伊 平, 张 磊, 包 健. 天目湖流域农业面源污染控制研究[J]. 污染防治技术, 2008, 21(6):38-40, 43.
YI Ping, ZHANG Lei, BAO Jian. Study on controlling of the agricultural non-point source pollution in the Tianmu Lake valley[J]. *Pollution Control Technology*, 2008, 21(6):38-40, 43.
- [19] 王晓燕, 张雅帆, 欧 洋. 北京密云水库上游太师屯镇非点源污染损失估算[J]. 生态与农村环境学报, 2009, 25(4):37-41.
WANG Xiao-yan, ZHANG Ya-fan, OU Yang. Economic loss caused by non-point source pollution: A case study of Taishitun Town, upper catchment of Miyun reservoir, Beijing[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2009, 25(4):37-41.
- [20] 张 导, 张 琰, 宋学宏, 等. 苏州市环太湖农业面源污染调查及控制对策[J]. 农业环境与发展, 2009(6):71-75.
ZHANG Dao, ZHANG Yan, SONG Xue-hong, et al. Investigation and control countermeasures of non-point source pollution around Tai Lake in Suzhou[J]. *Agro-Environment and Development*, 2009(6):71-75.
- [21] 朱 松. 小流域非点源 N、P 污染排放估算及控制对策研究[D]. 杭州:浙江大学, 2004.
ZHU Song. Study on non-Point source pollution of nitrogen and phosphorus drainage evaluating and its controlling on small watershed[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004.
- [22] 李定强, 王继增, 万洪富, 等. 广东省东江流域典型小流域非点源污染物流失规律研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(3):12-18.
LI Ding-qiang, WANG Ji-zeng, WAN Hong-fu, et al. Law of non-point source pollutants losses in a typical small watershed of Dongjiang drainage basin of Guangdong province[J]. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1998, 4(3):12-18.
- [23] Mitchell R D, Harrison R, Russell K J, et al. The effect of crop residue incorporation date on soil inorganic nitrogen, nitrate leaching and nitrogen mineralization[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 32(4):294-301.
- [24] Tapia-Vargas M, Tiscareo-Lopez M, Stone J J, et al. Tillage system effects on runoff and sediment yield in hillslope agriculture[J]. *Field Crops Research*, 2001, 69(2):173-182.
- [25] Diez J A, Caballero R, Roman R, et al. Integrated fertilizer and irrigation management to reduce nitrate leaching in central Spain[J]. *Journal of Environment Quality*, 2000, 29:1539-1547.
- [26] GUO H Y, ZHU J G, WANG X R, et al. Case study on nitrogen and phosphorus emissions from paddy field in Taihu region[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2004, 26(2):209-219.
- [27] 王 静, 郭熙盛, 王允青, 等. 保护性耕作与平衡施肥对巢湖流域稻田氮素径流损失及水稻产量的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(6):1164-1171.
WANG Jing, GUO Xi-sheng, WANG Yun-qing, et al. Effects of conservation tillage and balanced fertilization on nitrogen loss from paddy field and rice yields in Chaohu region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(6):1164-1171.
- [28] 汪 涛, 罗贵生, 朱 波, 等. 施肥对紫色土坡耕地氮素淋失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(4):716-722.
WANG Tao, LUO Gui-sheng, ZHU Bo, et al. Effects of fertilization on nitrogen leaching from hillslope cropland of purple soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(4):716-722.
- [29] 王 云, 徐昌旭, 汪怀建, 等. 施肥与耕作对红壤坡地养分流失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(3):500-507.
WANG Yun, XU Chang-xu, WANG Huai-jian, et al. Effect of fertilizer levels and tillage methods on nutrient loss of red soil slopes[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(3):500-507.
- [30] 石艳平, 段增强. 水肥综合管理对减少滇池北岸韭菜地氮磷流失的研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(10):2138-2144.
SHI Yan-ping, DUAN Zeng-qiang. Integrated management of water and fertilizer to reduce nitrogen, phosphorus loss from Chinese chive field in the north bank of Dianchi lake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(10):2138-2144.
- [31] 杨金玲, 张甘霖, 张 华, 等. 丘陵地区流域土地利用对氮素径流输出的影响[J]. 环境科学, 2003, 24(1):16-23.
YANG Jin-ling, ZHANG Gan-lin, ZHANG Hua, et al. The impact of land uses on watershed runoff nitrogen discharge in hilly regions[J]. *Environmental Science*, 2003, 24(1):16-23.
- [32] 黄宗楚, 郑祥民, 姚春霞. 上海旱地农田氮磷随地表径流流失研究[J]. 云南地理环境研究, 2007, 19(1):6-10.
HUANG Zong-chu, ZHENG Xiang-min, YAO Chun-xia. The study of nonirrigated farmland nitrogen and phosphorus loss with surface runoff in Shanghai[J]. *Yunnan Geographic Environment Research*, 2007, 19(1):6-10.
- [33] 马立珊, 王祖强, 张水铭, 等. 苏南太湖水系农业面源污染与控制对策研究[J]. 环境科学学报, 1997, 17(1):39-47.
MA Li-shan, WANG Zu-qiang, ZHANG Shui-ming, et al. Pollution from agricultural non-point sources and its control in river system of

- Taihu Lake, Jiangsu[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1997, 17(1):39-47.
- [34] 段永蕙, 张乃明, 张玉娟. 施肥对滇池流域农田土壤氮流失的影响[J]. 水土保持研究, 2004, 11(3):243-244, 271.
DUAN Yong-hui, ZHANG Nai-ming, ZHANG Yu-juan. Effect of fertilizer application on nitrogen loss from farmland runoff in Dianchi watershed[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2004, 11(3):243-244, 271.
- [35] 付伟章, 史衍玺. 施用不同氮肥对坡耕地径流中 N 输出的影响[J]. 环境科学学报, 2005, 25(12):1676-1681.
FU Wei-zhang, SHI Yan-xi. Effect on nitrogen output in farmland with different nitrogen fertilization[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(12):1676-1681.
- [36] 于兴修, 杨桂山, 梁 涛. 西苕河流域土地利用对氮素径流流失过程的影响[J]. 农业环境保护, 2002, 21(5):424-427.
YU Xing-xiu, YANG Gui-shan, LIANG Tao. Effects of land use in Xitiaoqi catchment on nitrogen losses from runoff[J]. *Agro-Environmental Protection*, 2002, 21(5):424-427.
- [37] 张乃明, 张玉娟, 陈建军, 等. 滇池流域农田土壤氮污染负荷影响因素研究[J]. 中国农学通报, 2004, 20(5):148-150.
ZHANG Nai-ming, ZHANG Yu-juan, CHEN Jian-jun, et al. Factors of influencing soil-nitrogen pollution load of sloping field in the Dianchi Lake watershed[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2004, 20(5):148-150.
- [38] 邬 伦, 李佩武. 降雨-产流过程与氮、磷流失特征研究[J]. 环境科学学报, 1996, 16(1):111-116.
WU Lun, LI Pei-wu. Studies on rainfall process, flow-making and nitrogen and phosphorus losses[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1996, 16(1):111-116.
- [39] 依艳丽. 土壤物理研究法[M]. 北京:北京大学出版社, 2009.
YI Yan-li. Research methods of soil physical properties[M]. Beijing: Peking University Press, 2009.
- [40] 李洪成. SPSS18 数据分析基础与实践[M]. 北京:电子工业出版社, 2010.
LI Hong-cheng. Basis and practice for data analysis[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010.
- [41] 戴兴美. 山东省上市公司高管薪酬影响因素研究[D]. 济南:山东经济学院, 2010.
DAI Xing-mei. Study on contributing factors of top executive compensation of listed companies in Shandong province[D]. Jinan: Shandong Economic University, 2010.