

核素 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 示踪法在小流域农业氮磷流失研究中的应用

杨育红¹, 阎百兴², 严登华³

(1.华北水利水电学院水利学院, 郑州 450011; 2.中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012; 3.中国水利水电科学研究院 水资源研究所, 北京 100038)

摘 要:利用 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 核素示踪和野外定位监测相结合的方法,通过研究吉林省长春市莫家沟小流域土壤流失厚度和土壤侵蚀模数,探讨土壤侵蚀与农业面源污染的输移关系,估算了农业面源颗粒态和水溶态污染负荷。结果表明,土壤流失厚度 $1.85 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,土壤侵蚀模数为 $2331 \text{ t} \cdot \text{km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$,属于中度-强烈侵蚀水平;研究区单位面积年均输入水库的农业面源污染物总氮(TN)、水溶态总氮(WEN)、氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)、硝态氮($\text{NO}_3\text{-N}$)、总磷(TP)、水溶态总磷(WEP)、磷酸盐磷($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)负荷分别为 29、0.097、0.025、0.059、12、0.004、0.003 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;土壤流失的 TN、TP 分别占多年平均化肥施用量的 22%和 10%。流失土壤携带的颗粒态 TN、TP 污染负荷分别是能被降雨径流浸提形成水溶态氮磷 WEN、WEP 污染负荷的 300 倍和 3000 倍。侵蚀流失的土壤颗粒是 N、P 流失的主要载体,也是最大的面源污染。

关键词:核素示踪法;土壤侵蚀;农业面源污染;中国东北

中图分类号:X522 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)10-1994-05

Estimation of Nitrogen and Phosphorus Losses Using $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ in a Small Watershed

YANG Yu-hong¹, YAN Bai-xing², YAN Deng-hua³

(1.College of Water Resources, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China; 2.Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China; 3.Water Resources Department, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Agricultural nonpoint sources pollution nutrient loads are closely related to soil erosion. Northeast of China is a key commodity grain base, and is one of the most important water erosion areas. The loads of particulate nitrogen and phosphorus(TN, TP), and water extractable nitrogen and phosphorus(WEN, $\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, WEP, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) were estimated using by $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ nuclear tracing technique and field monitoring method. The annual mean erosion thickness was $1.85 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ at the Mojiagou watershed in Changchun City Jilin Province. The erosion intensity was $2331 \text{ t} \cdot \text{km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$, classified to the moderate and severe degree transition section according to techniques standards for comprehensive control of soil erosion in the black soil region(SL 446—2009). The fallout tracer technique of $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ is feasible to quantify the soil erosion and the associated pollutants loads in Northeast of China. The annual mean values of pollution loads were TN 29 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, WEN 0.097 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, $\text{NH}_3\text{-N}$ 0.025 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ 0.059 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, TP 12 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, WEP 0.004 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 0.003 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, respectively. The particulate nitrogen and phosphorus loss rates per year with soil erosion accounted for 22% and 10% of the fertilizers applied, respectively. The particulate nitrogen and phosphorus loads were 300 times and 3000 times as that of water extractable nitrogen and phosphorus. Soil particles with soil loss were the main medium to transport nitrogen and phosphorus and the key nonpoint sources pollutants.

Keywords: fallout tracer technique; soil erosion; agricultural nonpoint sources pollution; Northeast China

收稿日期:2012-03-27

基金项目:国家“十二五”科技支撑计划课题(2012BAC19B03);华北水利水电学院高层次人才科研启动项目(001289)

作者简介:杨育红(1971—),女,河南焦作人,博士,讲师,主要从事水环境保护与环境评价教学研究。E-mail:yangyuhong1971@163.com

农田土壤侵蚀与农业面源污染密不可分^[1-2]。农业面源污染是在近 100 年土壤侵蚀研究基础上发展起来的,经历了从土壤学家对农业化学品在土壤中的行为及作用机理的农学意义研究到环境学家或从环境角度研究其环境意义的渐变过程。农田土壤流失既导致土地退化、加剧土壤贫瘠,又淤塞河道、污染水体,是农业面源污染防治的重要内容。

农业面源污染负荷量化是研究、控制和治理流域农业面源污染的关键^[3-4]。核素示踪法在不影响土地利用状况的前提下,通过示踪元素含量的分布差异来研究土壤侵蚀的发生和分布规律,具有分析精度和量化程度较高,节时省力的优势。在世界不同区域的广泛环境中,核武器爆炸产生的 ^{137}Cs 已成功用于测算土壤侵蚀速率^[5-6]。但对于侵蚀严重地带、 ^{137}Cs 含量日益衰减低于仪器检测值的地区,以及受切尔诺贝利核事故泄漏 ^{137}Cs 干扰等地区,应用核素 ^{137}Cs 示踪法存在局限性。稳定态的核素 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 示踪法则逐渐受到土壤侵蚀研究者的关注,正在成为研究土壤侵蚀的良好示踪剂^[7-9],进而用于量化随土壤侵蚀流失的氮(N)磷(P)负荷。

农业面源 N、P 污染与土壤溶解性无机 N、P 含量及其所处溶液环境有关。土壤溶解性无机 N、P 含量的测定,主要是通过不同的浸提剂将土壤中的溶解性

无机 N、P 转移到浸提液中,然后测定 N、P 含量。测定结果主要用于说明土壤的供 N、P 水平,是判断施用 N、P 肥的指标,具有明显的农学意义^[10]。水环境的农业面源污染物主要来自于土壤圈中的农用化学物质,它的产生、迁移与转化过程实质上是污染物从土壤圈向水圈扩散的过程^[11]。长期以来,土壤农业化学分析方法中测定土壤无机态 N、P 的方法侧重于土壤中 N、P 养分的农学意义,对于能被降雨径流携带、具有水环境意义的土壤水溶性 N、P 关注较少,可能夸大因降雨径流引起的农业面源污染贡献率。防治坡耕地农业面源污染的首要任务是量化随水、土流失的污染负荷,针对不同生态环境有的放矢布置管理措施。

研究区为吉林省长春市主要饮用水源地石头口门水库的莫家沟小流域,通过运用核素 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 示踪技术与野外监测相结合,探讨农业面源污染物颗粒态和水溶态氮磷的输出负荷,以期水库小流域水土流失控制和面源污染防治措施配置提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

莫家沟小流域位于吉林省长春市主要饮用水源地石头口门水库西岸(图 1),地理位置东经 $125^{\circ}43'$ ~

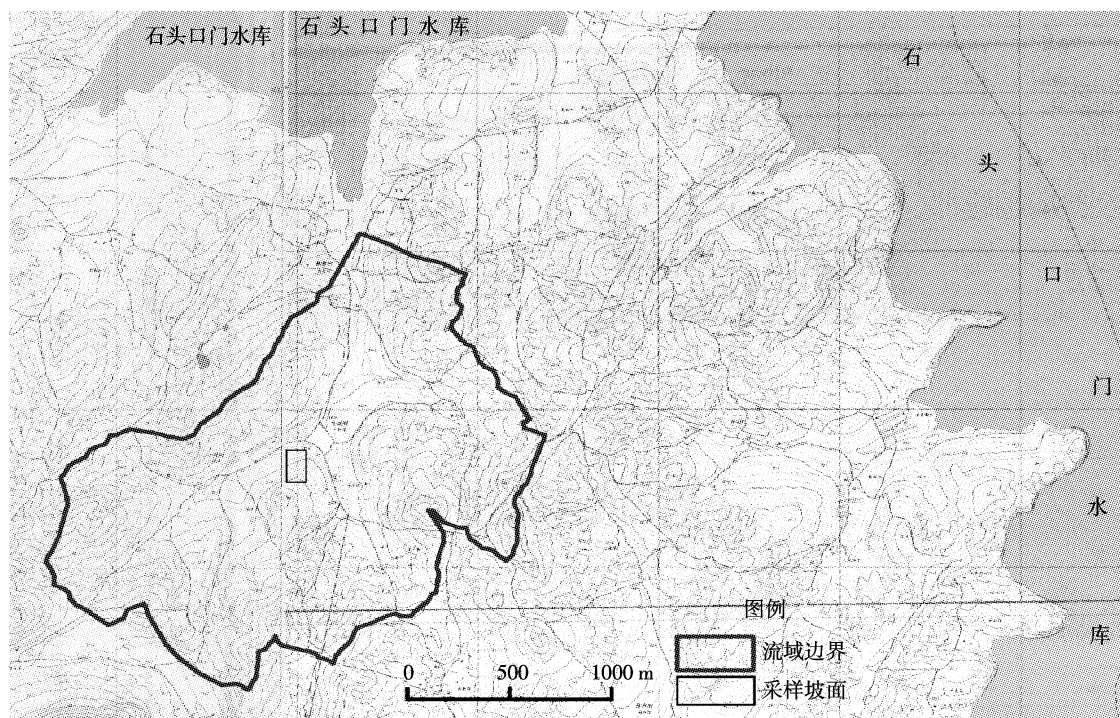


图 1 研究区位置图

Figure 1 Location of selected slopes and study area

125°46', 北纬 43°53'~43°54'。属于中温带半湿润气候,年均气温 4.9℃,多年平均降雨量 642 mm,其中 80%以上的降雨集中在 6—8 月,以短时阵雨为主。是典型雨养旱作农业区,作物以玉米为主,一年一熟;每年播种前一次性翻地、施肥、起垄,耕层深度一般为 20 cm,人工点播;生长期不追肥、不翻地;9 月底至 10 月初收割。化肥施用量(实物)750 kg·hm⁻²,折纯 N、P 肥分别为 130、120 kg·hm⁻²。

1.2 土壤样品的采集

1.2.1 背景样点和普通样点选取

理想的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 背景点是既没有发生土壤侵蚀、流失或沉积,又无人为扰动的地点。坡顶平坦的荒草地是最佳选择。根据土壤核素示踪技术背景点选择的特殊要求,通过调查当地居民、实地踏勘和实验室分析,选择一老坟地作为背景点。该点为坡顶平缓台地,地面被灌丛、荒草覆盖,覆盖度在 95%以上,枯落物下有完整的有机质层。坟前所立碑铭显示,立碑时间道光十年(1850 年),处于自然状态,现场调查未发现有人为扰动的痕迹。该地块地貌部位特殊,地形平坦,植被茂密,无产流和汇流条件,基本可以排除水力侵蚀和堆积的可能,是理想的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 背景点。

土壤普通样点选取在坡耕地,坡面上布置 3 条平行剖面线,从坡上到坡底间隔 20~60 m 距离设置采样点。土壤容重采用环刀法,在小流域内按 100 m×100 m 网格法布置采样点,选取坡耕地上样点进行采样。

1.2.2 土壤样品采集与处理

每份土壤样品均采集约 2000 g。采样时间为 2008 年和 2009 年 5 至 10 月。采集的核素背景点和坡面土壤样品经自然风干、研磨、过筛(2.0 mm),称取约 400 g,密封装样后进入实验室分析阶段,待测核素活度。

风干样品过 0.25 mm 筛,称取约 50 g,装入纸袋内,备测土壤全氮和全磷。采集的新鲜土壤,过 2 mm 筛,称取约 50 g,装入广口瓶,备测水溶态氮磷。

土壤容重样品采集用直径 5.0 cm、高 2.5 cm 的环刀切割未搅动的自然状态土样,使土样充满其中,称量后计算单位容积的烘干重量,即为土壤容重。

1.3 样品分析

1.3.1 核素测定方法

核素 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 采用 γ 谱测定法,测试地点在中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所 IAEA 环境放射性分析网络实验室,测试仪器为美国堪培拉公司(CANBERRA)生产的高纯锗(HPGe)探头多道 γ 能谱仪 BE5030。测试 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的土壤样品需密封 ≥ 28 d,使

^{226}Ra 与 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 处于永久衰变平衡体系,总 ^{210}Pb 特征峰能量在 46.5 keV, ^{226}Ra 在 609.3 keV,测量 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 误差控制在 $\pm 10\%$,测量时间控制在 80 000 s 以上。

1.3.2 氮磷分析

样品氮磷分析在中国科学院东北地理与农业生态研究所湿地生态与环境重点实验室进行。土壤颗粒态和水溶态氮磷分别进行,其中颗粒态氮磷中的土壤全氮(TN)采用开氏消煮法,全磷(TP)采用酸溶-钼锑抗比色法。

土壤水溶态氮磷分析以去离子水为浸提剂,制备水浸提液。称取过筛后的新鲜土样 5.0 g,按 5:1 的水土比加入去离子水,室温振荡 60 min,3000 r·min⁻¹ 离心 30 min,上清液经 0.45 μm 滤膜过滤,滤液待测土壤水溶态氮磷即 WEN 和 WEP。测试仪器为紫外可见分光光度计(TU-1900)。WEN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法、NO₃⁻-N 采用酚二磺酸光度法、NH₃-N 采用纳氏试剂光度法;WEP 采用过硫酸钾消解钼锑抗分光光度法、PO₄³⁻-P 采用钼锑抗分光光度法。

1.4 土壤侵蚀量计算

从宏观看,农业面源污染主要来源于土壤侵蚀和土壤物质的溶出。随侵蚀土壤颗粒损失的是颗粒态氮磷,土壤物质的溶出以水溶态氮磷表示。明确颗粒态和水溶态污染负荷的贡献,是选择和实施农业面源污染防治措施的根本依据。

应用 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 核素示踪技术,农耕地年均土壤流失厚度计算公式如下^[9]:

$$h = H(A_{\text{ref}} - A) \lambda / A \quad (1)$$

式中: h 为年均土壤侵蚀厚度,cm; A 为样点 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 面积活度, Bq·m⁻²; A_{ref} 为 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 背景值面积活度, Bq·m⁻²; λ 为衰变常数,取 0.0307^[12]; H 为犁耕层深度,研究区实测 20 cm。

1.5 土壤侵蚀引起的面源污染

1.5.1 吸附态负荷

土壤侵蚀形成的吸附态污染负荷计算:

$$M_s = \rho_s \cdot \alpha \cdot d \cdot A \cdot L_s \quad (2)$$

式中: M_s 是土壤吸附态污染负荷, kg; ρ_s 是土壤容重, g·cm⁻³; α 是泥沙输移比; d 是土壤侵蚀厚度, mm; A 是土地面积, km²; L_s 是土壤物质含量, mg·kg⁻¹。

1.5.2 溶解态负荷

土壤侵蚀变化,流失土壤携带的面源 N、P 污染负荷也随之变化。根据土壤侵蚀量和侵蚀土壤的溶解态 N、P 含量,计算溶解态 N、P 污染负荷。

1.5.3 参数确定

(1) 土壤侵蚀厚度 d

采用核素 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 示踪技术取得的土壤侵蚀厚度 $d=1.85\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

(2) 土地面积 A

通过应用 ArcGIS9.0 空间分析模块进行土地利用数据采集、分析和计算,得到莫家沟小流域面积 $A=1.667\text{ km}^2$ 。

(3) 泥沙输移比 α

莫家沟小流域毗邻石头口门水库,核素示踪技术显示坡面无泥沙堆积现象;暴雨期间河道径流激增,携带冲刷泥沙能力较大,很短时间内侵蚀泥沙就可以进入水库;现场观测认为,莫家沟小流域侵蚀泥沙全部进入受纳水体,故选取泥沙输移比为 $\alpha=1$ 。

(4) 土壤容重 ρ_s

取样点土壤容重算术平均值 $\rho_s=1.26\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

(5) 土壤物质含量 L_s

土壤颗粒态氮磷 TN、TP 和水溶态氮磷浓度见表 1。

2 结果与讨论

2.1 土壤侵蚀速率及评价

根据核素活度,与核素背景值比较,可以定性分析或定量计算该地点的土壤流失量或堆积量。因此,核素背景值的确定是应用核素模型的关键。运用 SPSS 统计分析研究区内 5 个背景样点的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 背景值,研究区 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 背景值为 $8954\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ 。应用 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 核素公式(1),计算坡面土壤侵蚀速率 $0.27\sim 2.81\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$,加权平均坡面土壤侵蚀速率为 $1.85\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 。吉林省德惠市八家庙和松花江镇与莫家沟地形地貌相似,应用 ^{137}Cs 示踪法计算坡面土壤侵蚀速率分别为 $3.2\sim 4.3\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ [13]和 $1.01\sim 2.80\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ [14];应用 ^{137}Cs 法得到黑龙江省农垦总局九三分局鹤山农场坡面平均土壤流失量约 $1.80\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ [15]。用 RUSLE 模型计算吉林省土壤侵蚀速率为 $3.0\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ [16];在中国科学院东北地理与农业生态研究所黑土农业试验示范基地,通过对比耕作土壤和背景土壤有机碳含量变化得到黑土区

土壤流失速率为 $1.81\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ [17],与松辽水利委员会公布的黑土区平均每年土壤流失厚度 $0.1\sim 1\text{ cm}$ 的侵蚀速率相吻合。由于土壤侵蚀的空间变异性很大,方法不同,结果各异,应加强多种方法,或两种以上核素示踪方法的对比研究。

应用核素 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 示踪法计算小流域土壤侵蚀模数为 $2331\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。根据《黑土区水土流失综合防治技术标准(SL 446—2009)》,吉林省长春市莫家沟小流域侵蚀强度超过土壤侵蚀容许流失量 $200\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,为中度侵蚀和强烈侵蚀过渡段。按照现在的土壤侵蚀速率,如果不采取任何措施加以控制,研究区目前 $10\sim 30\text{ cm}$ 厚度的土壤将在 $50\sim 100\text{ a}$ 内消失,后果堪忧。

2.2 氮磷流失水平及负荷量化

由表 1 可知,莫家沟小流域随土壤侵蚀损失的颗粒态 TN $4889\text{ kg}\cdot\text{a}^{-1}$,单位面积 TN 流失 $29\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,占化肥施用量 22%;颗粒态 TP 年流失 $2022\text{ kg}\cdot\text{a}^{-1}$,单位面积 TP 流失 $12\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,占化肥施用量 10%。随土壤流失的水溶态总氮 WEN 负荷是水溶态总磷 WEP 负荷的 23 倍;土壤水溶态无机 N($\text{NH}_3\text{-N}+\text{NO}_3\text{-N}$)占 WEN 的 87%,而仅占土壤 TN 的 0.33%。土壤溶解态 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 占 WEP 的 76%,而土壤 WEP 占 TP 量仅为 0.03%,这与表层土壤无机 N、P(水溶态、交换态和固定态)占土壤 TN、TP 含量不到 20%的规律相一致[10]。黑土是恒负电荷土壤,吸附 N、P 形态的能力顺序为 $\text{NH}_4^+>\text{PO}_4^{3-}>\text{NO}_3^-$ [18]。土壤中 NH_4^+ 大部分被负电荷的土壤胶体吸收,减少了 NH_4^+ 的移动性,使得 $\text{NH}_3\text{-N}$ 流失负荷小于 $\text{NO}_3\text{-N}$ 。由研究结果可见,流失土壤携带的颗粒态 TN、TP 污染负荷分别是能被降雨径流漫提形成水溶态总氮 WEN、水溶态总磷 WEP 污染负荷的 300 倍和 3000 倍。农田 N、P 流失负荷的 95%以上随泥沙一起迁移,而且侵蚀泥沙对 N、P 等养分有富集作用。侵蚀流失的土壤颗粒是农田 N、P 流失的主要载体,也是最大的面源污染。

3 结论

应用 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 核素示踪技术,计算吉林省长春市莫

表 1 莫家沟小流域土壤氮磷含量及流失负荷

Table 1 Concentration and load of soil nitrogen and phosphorus in Mojiagou watershed

项目	颗粒态		水溶态				
	TP	TN	$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	WEP	$\text{NH}_3\text{-N}$	$\text{NO}_3\text{-N}$	WEN
浓度/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	505	1222	0.124	0.163	1.046	2.455	4.025
负荷/ $\text{kg}\cdot\text{a}^{-1}$	2022	4889	0.5	0.7	4.2	9.8	16.1
流失水平/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	12	29	0.003	0.004	0.025	0.059	0.097

家沟小流域土壤侵蚀厚度为 $1.85 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 侵蚀模数 $2331 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 为中度侵蚀和强烈侵蚀过渡段。每年随土壤侵蚀损失的颗粒态 TN、TP 负荷分别为 29 、 $12 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 占多年平均化肥施用量的 22% 和 10%。土壤水溶态无机氮 ($\text{NH}_3\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$) 占土壤水溶态 WEN 的 87%, 而仅占土壤颗粒态 TN 的 0.33%; 土壤水溶态 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 占 WEP 的 76%, 而土壤水溶态 WEP 仅占颗粒态 TP 量的 0.03%。侵蚀流失的土壤颗粒是 N、P 流失的主要载体, 为石头口门水库坡耕地实行有效的面源污染防治管理措施提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 杨爱民. 水土保持措施防治非点源污染的作用机制[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(6):98-101.
YANG Ai-min. Affecting mechanism of soil and water conservation measures controlling nonpoint source pollution[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2007, 5(6):98-101.
- [2] 张玉斌, 郑粉莉, 武敏. 土壤侵蚀引起的农业非点源污染研究进展[J]. 水科学进展, 2007, 18(1):123-132.
ZHANG Yu-bin, ZHENG Fen-li, WU Min. Research progresses in agricultural non-point source pollution caused by soil erosion[J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(1):123-132.
- [3] 张水龙. 基于流域单元的农业非点源污染负荷估算[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(1):71-74.
ZHANG Shui-long. Calculating agricultural non-point source pollution load based on watershed unit[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(1):71-74.
- [4] 杨育红, 阎百兴, 沈波, 等. 第二松花江流域非点源污染输出负荷研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(1):161-165.
YANG Yu-hong, YAN Bai-xing, SHEN Bo, et al. Study on load of non-point source pollution in the second Songhua River basin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(1):161-165.
- [5] 阎百兴, 杨育红, 沈波, 等. ^{137}Cs 示踪法在黑土区农业非点源污染负荷研究中的应用[J]. 地理科学, 2010, 30(1):124-128.
YAN Bai-xing, YANG Yu-hong, SHEN Bo, et al. Agricultural nonpoint source pollution loads prediction using Caesium-137 tracing technique in black soil region, Northeast China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2010, 30(1):124-128.
- [6] Sadiki A, Faleh A, Nanas A, et al. Assessing soil erosion and control factors by the radiometric technique in the Boussouab catchment, Eastern Rif, Morocco[J]. *Catena*, 2007, 71:13-20.
- [7] YANG Yu-hong, YAN Bai-xing, ZHU Hui. Estimating soil erosion using ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ in Northeast China[J]. *Pedosphere*, 2011, 21(6):706-711.
- [8] Walling D E, Collins A L, Sickingabula H M. Using unsupported lead-210 measurements to investigate soil erosion and sediment delivery in a small Zambian catchment[J]. *Geomorphology*, 2003, 52:193-213.
- [9] Zhang X, Qi Y, Walling D E, et al. A preliminary assessment of the potential for using $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ measurement to estimate soil redistribution rates on cultivated slopes in the Sichuan Hilly Basin of China[J]. *Catena*, 2006, 68:1-9.
- [10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000:500-502.
LU Ru-kun. Analysis methods of soil agro-chemistry[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000:500-502.
- [11] 张水龙, 庄季屏. 农业非点源污染研究现状与发展趋势[J]. 生态学杂志, 1998, 17(6):51-55.
ZHANG Shui-long, ZHUANG Ji-ping. Current situation and development tendency of researches of non-point source pollution in agriculture[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1998, 17(6):51-55.
- [12] 张信宝, Walling D E, 冯明义, 等. $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 在土壤中的深度分布和通过 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 法求算土壤侵蚀速率模型[J]. 科学通报, 2003, 48(5):502-506.
ZHANG Xin-bao, Walling D E, FENG Ming-yi, et al. $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ depth distribution in soil and calibration models for assessment of soil erosion rates from $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ measurements[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(5):502-506.
- [13] 阎百兴, 汤洁. 黑土侵蚀速率及其对土壤质量的影响[J]. 地理研究, 2005, 24(4):499-506.
YAN Bai-xing, TANG Jie. Study on black soil erosion rate and the transformation of soil quality influenced by erosion[J]. *Geographical Research*, 2005, 24(4):499-506.
- [14] Fang H J, Yang X M, Zhang X P, et al. Using ^{137}Cs tracer technique to evaluate erosion and deposition of black soil in Northeast China[J]. *Pedosphere*, 2006, 16(2):201-209.
- [15] 刘宝元, 阎百兴, 沈波, 等. 东北黑土区农地水土流失现状与综合治理对策[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(1):1-8.
LIU Bao-yuan, YAN Bai-xing, SHEN Bo, et al. Current status and comprehensive control strategies of soil erosion for cultivated land in the Northeastern black soil area of China[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2008, 6(1):1-8.
- [16] Yang X M, Zhang X P, Fang H J. Black soil degradation by rainfall erosion in Jilin, China[J]. *Land Degradation & Development*, 2003, 14:409-420.
- [17] Liang A Z, Zhang X P, Yang X M, et al. Estimation of total erosion in cultivated black soils in northeast China from vertical profiles of soil organic carbon[J]. *European Journal of Soil Science*, 2009, 60:223-229.
- [18] 李成保, 季国亮. 恒电荷土壤和可变电荷载土壤动电性质的研究 II 阴离子吸附和 pH 的影响[J]. 土壤学报, 2000, 37(1):62-68.
LI Cheng-bao, JI Guo-liang. Studies on electrokinetic properties of constant charge soils and variable charge soils II: Effect of anion adsorption and pH[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37(1):62-68.