

朱波, 汪涛, 况福虹, 等. 2008. 紫色土坡耕地硝酸盐淋失特征 [J]. 环境科学学报, 28(3): 525–533  
Zhu B, Wang T, Kuang F H, et al. 2008. Characteristics of nitrate leaching from hilly cropland of purple soil [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 28(3): 525–533

## 紫色土坡耕地硝酸盐淋失特征

朱波\*, 汪涛, 况福虹, 徐泰平, 唐家良, 武永峰

中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041

收稿日期: 2007-01-30 修回日期: 2007-06-14 录用日期: 2007-12-26

**摘要:** 利用具有壤中流测定功能的径流小区的定位观测结合土壤剖面硝酸盐累积的动态分析, 研究了紫色土坡地硝酸盐淋失特征。结果表明, 紫色土坡地硝酸盐呈旱季累积, 雨季淋失的特点, 而壤中流是紫色土硝酸盐淋失的主要通道。紫色土为土层浅、土壤下伏透水性极弱的紫色泥页岩, 同时夏季降雨丰富, 壤中流极为发育, 2003~2005 年壤中流平均流量为 169.7 mm, 占雨季径流量的 52.42%, 其中,  $\text{NO}_3^-$ -N 含量持续偏高, 2003~2005 年平均含量高达  $14.92 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 3 年平均随壤中流淋失的硝态氮达  $27.98 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 占年施肥量的 10.0%, 硝酸盐淋失具有季节与年际间差异, 淋失负荷主要受壤中流流量影响。紫色土坡地硝酸盐随壤中流大量淋失不仅造成当地浅层地下水硝酸盐污染, 而且将加剧长江三峡库区水环境压力。

**关键词:** 硝酸盐淋失; 壤中流; 迁移通量; 坡地; 紫色土

文章编号: 0253-2468(2008)03-525-09 中图分类号: X53 文献标识码: A

## Characteristics of nitrate leaching from hilly cropland of purple soil

ZHU Bo, WANG Tao, KUANG Fuhong, XU Taiping, TANG Jialiang, WU Yongfeng

Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041

Received 30 January 2007; received in revised form 14 June 2007; accepted 26 December 2008

**Abstract:** Nitrate leaching from hilly cropland of purple soil was studied by monitoring and analyses of nitrate accumulation in soil profiles. Experiments were conducted from 2003 to 2005 in artificial small catchments with subsurface flow monitoring. Results showed that nitrate accumulated in dry seasons and diminished in rainy seasons on the hilly cropland. Subsurface flow is the main pathway of nitrate leaching in the rainy season. Nitrate leaching through subsurface flow was influenced by a shallow soil layer (60 cm), low infiltration parent rock beneath the soil, and heavy rainfall in summer. Average annual discharge of subsurface flow from 2003 to 2005 was 169.7 mm, which amounted to 52.42% of total runoff in the rainy season. The content of  $\text{NO}_3^-$ -N in subsurface flow was persistently high with an average of  $14.92 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  between 2003 and 2005. Annual average loss of  $\text{NO}_3^-$ -N through subsurface flow was  $27.98 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , and accounted for 10.0% of total fertilizer nitrogen applied within a year.  $\text{NO}_3^-$ -N loss rates through subsurface flow showed seasonal patterns. It peaked during maize elongation and stamen stages, which accounted for 69% of the annual  $\text{NO}_3^-$ -N loss flux. Nitrate loss through subsurface flow results in *in situ* groundwater pollution and downstream pollution. Pollution by long-distance travel of soluble nitrate could become a major threat to the water quality in the region of the Three Gorges Reservoir.

**Keywords:** pollution; water quality; subsurface flow; nitrate loss flux; hilly land; purple soil

### 1 引言( Introduction)

氮是农业生产中最重要的养分限制因子(朱兆良等, 1994), 同时也是日益增长的环境污染因子。近期研究指出“氮污染是仅次于气候变暖和生物多样性衰减的全球性环境威胁”, 同时还强调水中过

量硝酸盐的危害(Giles, 2005)。水体和食物中过量的硝酸盐被视为重要的污染物, 大量的医学研究证明, 饮水中过量硝酸盐与胃癌、高血压、先天性中枢神经系统残疾等发生有关(Armijo, 1972; Haenszel, 1976; Dorsch, 1984)。因此,  $\text{NO}_3^-$ -N 含量已是衡量水质的重要指标之一, 而由硝酸盐等引起的地下水污

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 40571093); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(No. 2005CB121108)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 40571093) and the National Basic Research Program of China (No. 2005CB121108)

作者简介: 朱波(1966—), 男, 研究员(博士), E-mail: bzhuz@imde.ac.cn; \* 通讯作者(责任编辑)

Biography: ZHU Bo (1966—), male, professor(Ph. D.), E-mail: bzhuz@imde.ac.cn; \* Corresponding author

染是隐蔽渐进和代价高昂的,地下蓄水层一旦被污染,其净化极其困难。近年来,日益突出的环境问题驱动人们进一步关注硝酸盐淋失,从淋失理论、模型及数量等方面进行了大量的研究(Nelson, 1982; Wild, 1972; Shepherd, 1996; 王家玉等, 1996)。研究表明,土壤发生硝酸盐淋失必须满足两个基本条件,其一是土壤中有硝酸盐积累;其二土壤水分运动(黄满湘等, 2002; 张庆忠等, 2002)。尽管土壤硝酸盐淋溶的研究十分活跃,也获得了大量的科学数据与结论,但研究主要集中在平地,很少有人对坡地土壤氮素淋溶进行深入研究(张兴昌等, 2000; 孙波等, 2003)。然而,我国约 69% 以上的国土面积为山地、丘陵(钟祥浩, 2000),坡地农业在我国农田生态系统中占有重要地位,特别是长江上游,坡耕地约占耕地的 65%,其中紫色土是最重要的耕地资源,集中分布在四川省与重庆市(三峡库区),仅四川盆地面积达  $16 \times 10^4 \text{ km}^2$ (李仲明, 1991)。然而,紫色土区因土壤侵蚀严重更加关注地表径流与泥沙中氮素的迁移(黄丽等, 1998; 许峰等, 2002; 傅涛等, 2003),坡地氮素淋溶研究缺乏,坡地硝酸盐淋失途径与淋失量并不清楚。本文作者研究了紫色土坡耕地土壤硝酸盐淋失特征,重点分析坡地硝酸盐随壤中流迁移的过程特征及年淋失通量,以期为农业非点源污染的评估与控制及长江上游(三峡库区)水环境保护提供科学依据。

## 2 材料与方法 (Materials and methods)

### 2.1 试验点基本情况

试验地点位于中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站综合观测场内( $105^{\circ}27'E, 31^{\circ}16'N$ ), 试验区多年平均降雨量 826mm, 年均温  $17.3^{\circ}\text{C}$ ,  $>10^{\circ}\text{C}$  的积温  $6500^{\circ}\text{C}$ , 无霜期 295d。土壤为蓬莱镇组石灰性紫色土( $J_3 p$ ), 为典型旱作土壤, 坡度  $3 \sim 15^{\circ}$ , 平均土层厚度约 60cm。

### 2.2 观测试验设计与采样

#### 2.2.1 坡地壤中流过程与硝酸盐迁移观测设计

紫色土坡耕地土层浅薄( $30 \sim 80\text{cm}$ ), 为下伏透水性较弱的紫色泥页岩, 而紫色土区气候湿润, 年降雨量大都在  $800 \sim 1200\text{mm}$  之间, 降雨入渗进入土壤很快到达母岩难于继续下渗, 土壤水分常处于饱和(蓄满)状态, 坡向势能使大部分土壤水以壤中流的形式顺坡向下迁移, 2001 年依照紫色土坡地径流分配特征(见图 1), 自行设计建造了具有壤中流测定

功能的坡地径流小区, 能同时测定地表径流和壤中流。小区建造时安装可埋式 TDR 水分探头, 旱季每周用 TDR 测定 1 次水分含量, 雨季 2d 一次。在地表径流和壤中流测定池中安装 ISCO - 6712 水沙自动采集仪, 测定地表径流与壤中流产流过程中的水位变化(本文仅讨论壤中流部分, 地表径流另文介绍), 同时, 自产流始至结束采集壤中流样品, 采样频率先密后疏, 设定采样时间后由 ISCO 水沙采样仪自动采样, 测定其中  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  含量。观测与采样逢降雨产流必测, 测定时间为 2003 ~ 2005 年。径流小区坡度为  $7^{\circ}$ , 土层厚度 60cm, 面积  $8\text{m} \times 4\text{m}$ , 3 次重复, 重复小区设计、构建与观测完全一致。小区冬季种植小麦, 小麦季施氮肥(N 计)  $130\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、磷肥( $\text{P}_2\text{O}_5$  计)  $90\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、钾肥( $\text{K}_2\text{O}$  计)  $36\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ; 夏季种植玉米, 玉米季施氮肥(N 计)  $150\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、磷肥( $\text{P}_2\text{O}_5$  计)  $90\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、钾肥( $\text{K}_2\text{O}$  计)  $36\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。供试土壤 pH 8.83, 土壤质地为壤土, 土壤容重  $1.33\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 有机质、总氮含量分别为  $8.75$ 、 $0.62\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 碱解氮为  $42.29\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 饱和导水率为  $0.28\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

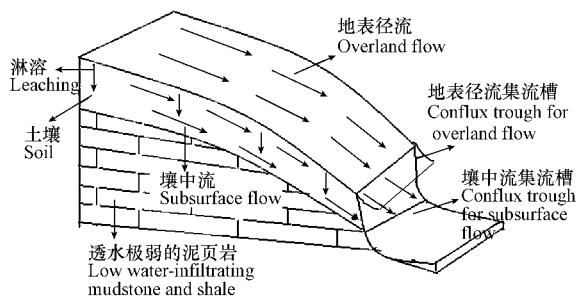


图 1 紫色土坡地径流流向与径流小区设计

Fig. 1 Hydrological pathway of slope land of purple soil and design sketch for runoff plot

**2.2.2 坡地硝酸盐累积的动态采样** 为避免扰动径流小区的土壤结构, 影响地表流、壤中流产流特点, 另选择与径流小区相邻的坡耕地, 其土壤类型、母质、坡度、土层与耕作、施肥等日常管理和径流小区相同, 在坡地上部用土钻分别于小麦苗期、拔节、扬花、成熟、收获(2003 年 11 月 20 日、2004 年 1 月 22 日、3 月 25 日、4 月 23 日) 和玉米苗期、四叶、拔节、抽雄、成熟、收获(2004 年 5 月 22 日、5 月 29 日、6 月 24 日、7 月 18 日、8 月 12 日、9 月 3 日、9 月 12 日) 等主要生育期采集土壤剖面( $0 \sim 15$ 、 $15 \sim 30$ 、 $30 \sim 50$ 、 $50 \sim 60\text{cm}$ ) 样品, 测定剖面土壤硝酸盐含量, 以初步了解坡地硝酸盐累积与迁移趋势。该样地土

壤 pH 8.68, 质地为壤土, 土壤容重  $1.38\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , 土壤有机质、总氮分别为  $9.22\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.73\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 碱解氮为  $39.44\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 饱和导水率为  $0.31\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ , 土壤基础性质与径流小区无显著差异(多因素比较  $p < 0.05$ ).

### 2.3 测定方法

土壤基本理化性质按常规方法测定(鲁如坤, 1999), 采集的壤中流样品经  $0.45\mu\text{m}$  滤膜过滤后用紫外可见分光光度计双波长法测定硝酸盐含量(谢贤群等, 1998); 土钻采集的新鲜土样迅速密封至塑料袋, 于冰箱内  $4^{\circ}\text{C}$  左右保存, 6h 内加 KCl 提取硝酸盐, 紫外可见分光光度双波长法测定提取液硝态氮含量(鲁如坤, 1999).

### 2.4 数据处理与计算

径流小区壤中流水位由 ISCO6712 水沙自动采样仪自带的自记水位计自动记录水位, 降雨产流停止后用笔记本电脑下载, 水位数据用于壤中流流量计算径流量、 $\text{NO}_3^-$ -N 含量及  $\text{NO}_3^-$ -N 迁移通量均为 3 个重复小区测定值的平均值, 壤中流产流过程及其中硝酸盐含量变化采用单个小区测定值.

土壤剖面  $\text{NO}_3^-$ -N 累积量由公式  $A = 0.1hdc$  计算. 其中,  $A$  为  $\text{NO}_3^-$ -N 累积量( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ),  $h$  为土层厚度(cm),  $d$  为土壤容重( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ),  $c$  为土壤鲜样  $\text{NO}_3^-$ -N 含量( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ).

单次降雨产流事件  $\text{NO}_3^-$ -N 随壤中流迁移通量  $Q_i = C_i \times q_i / 1000$ , 式中,  $Q_i$  为壤中流迁移通量( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ),  $C_i$  为壤中流  $\text{NO}_3^-$ -N 含量( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ),  $q_i$  为单位面积径流深(mm).

年或季节  $\text{NO}_3^-$ -N 迁移通量  $Q = 10 \times \sum Q_i$  ( $i = 1 \sim n$ ,  $n$  为年或季降雨产流事件数), 式中,  $Q$  为  $\text{NO}_3^-$ -N 迁移通量( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ).

## 3 结果(Results)

### 3.1 土壤剖面硝酸盐分配与累积特征

2003~2004 年在小麦和玉米生长季采集坡地土壤剖面样, 分析土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量的动态变化, 结果见图 2. 小麦季表层和亚表层土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量呈下降趋势, 到收获时处于最低值, 约  $2.35\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 而下层( $30\sim50\text{ cm}$ )与底层( $50\sim60\text{ cm}$ )土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量呈逐渐升高趋势, 分别由苗期的  $10.10\text{, }6.26\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  上升至收获期的  $54.37\text{, }56.49\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 说明硝酸盐旱季在土壤中下层累积(在土壤剖面  $30\sim50\text{ cm}$  左右), 而雨季整个土壤剖面  $\text{NO}_3^-$ -N 含量偏低, 并且降雨量集中的拔节期至抽雄期, 土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量降至最低, 表明土壤剖面累积的硝酸盐雨季有迁移趋势, 紫色土土壤剖面硝酸盐分配特征可能与坡地降雨径流过程有关. 因硝酸盐溶于水, 其移动主要受水分驱动(Young et al., 2005).

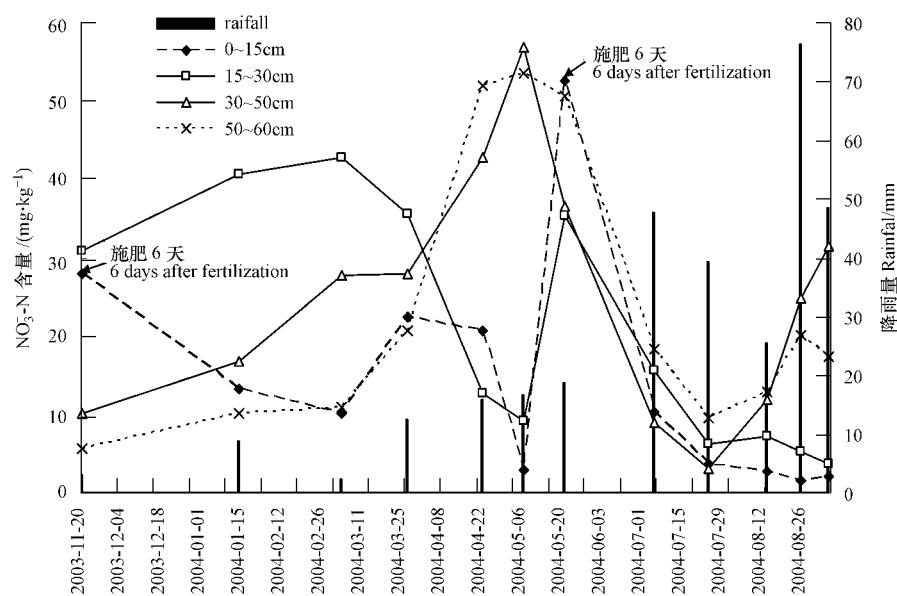


图 2 紫色土坡地土壤剖面硝态氮含量的季节变化

Fig. 2 Seasonal patterns of  $\text{NO}_3^-$ -N at soil profile of slope land of purple soil

进一步分析土壤剖面  $\text{NO}_3^-$ -N 累积特征,发现小麦季紫色土剖面  $\text{NO}_3^-$ -N 累积较多(见表 1),除苗期(施肥后 6d)外,在小麦的拔节、扬花期,土壤表层(0~15cm)  $\text{NO}_3^-$ -N 累积较少,主要是作物吸收所致,而亚表层(15~30cm)和中下层(30cm 以下)呈明显累积特征,并随降雨有下移趋势。而在小麦生长后期,特别在成熟和收获期,土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 累积达到最大值,土壤中下层(30cm 以下)累积较多,整个土层累积量高达  $259.13 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。而玉米季硝酸盐累积特征与小麦季不同,除苗期累积最高(350.65

$\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ),是施肥与小麦季累积的共同作用,其它生育期各剖面层次  $\text{NO}_3^-$ -N 累积量明显低于小麦季(见表 1),而在拔节(6月下旬到 7月中旬)和抽雄期(7月下旬到 8月上旬)最低,这段时间属降雨高峰期,推测可能与硝酸盐淋溶损失有关。而玉米成熟、收获期土壤剖面硝酸盐累积又出现上升趋势,可能因作物氮吸收停滞,而土壤干湿交替有利于硝化作用(Stevenson, 1982),其它研究发现紫色土硝酸盐与铵离子在雨季存在此消彼长的态势(谢红梅等, 2006)。

表 1 紫色土土壤剖面  $\text{NO}_3^-$ -N 累积量Table 1 Accumulated  $\text{NO}_3^-$ -N at the soil profile of purple soil $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 

土壤层次 Soil layer /cm	土壤容重 Soil bulk density $/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	小麦生育期(2003 年 11 月~2004 年 5 月) Bearing stage of wheat (Nov. 2003~May 2004)					
		苗期 Seedling	拔节 Jointing	扬花 Flowering	成熟 Mature	收获 Harvest	$\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$
0~15	1.29	53.99	25.74	19.74	43.54	40.25	
15~30	1.33	61.45	81.00	85.39	71.02	25.34	
30~50	1.40	28.56	47.04	77.84	78.40	119.84	
50~60	1.42	7.95	14.48	14.07	29.54	73.70	
全土 Soil profile		151.95	168.26	197.04	222.50	259.13	

土壤层次 Soil layer /cm	土壤容重 Soil bulk density $/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	玉米生育期(2004 年 5 月~9 月) Growing stage of maize (May~Sept. 2004)					
		苗期 Seedling	四叶 Four-leaf	拔节 Jointing	抽雄 Stamen	成熟 Mature	收获 Harvest
0~15	1.29	101.78	19.93	7.35	5.42	4.26	4.83
15~30	1.33	70.42	31.12	12.57	14.36	7.38	6.22
30~50	1.40	102.48	24.92	8.96	33.60	67.92	78.4
50~60	1.42	75.97	71.99	39.48	18.32	28.68	24.71
全土 Soil profile		350.65	147.96	68.36	71.70	108.24	114.16

### 3.2 紫色土坡地壤中流产流特征

#### 3.2.1 壤中流产流特征及其与降雨特性的关系

2003~2005 年共观测到 29 次壤中流, 壤中流流量在 2.6~52.7mm 范围内, 2003、2004、2005 年壤中流平均流量分别为 15.1、24.1、14.2mm, 历次壤中流产流事件的降雨量均在 20mm 以上, 而降雨强度的范围较宽(见图 3)。统计分析表明, 降雨量与壤中流径流深呈显著指数相关, 径流深与降雨量的回归方程为  $y = 1.7436e^{0.0474x}$  ( $R^2 = 0.684^{**}$ ,  $N = 29$ ;  $y$  为径流深,  $x$  为降雨量 (mm))。紫色土坡地土层浅薄, 且土壤田间持水力低、土壤疏松(李仲明, 1991), 土壤水分极易蓄满, 持续降雨时, 水分下渗至土壤-岩石界面, 因紫色泥页岩渗透性弱, 水分难以垂直入渗而沿坡向汇集成壤中流。但壤中流流量与平均雨强的相关性不显著(见图 3)。原因可能

是强降雨的雨滴溅蚀导致泥沙颗粒堵塞表土孔隙, 有利于地表径流的产生, 阻止降雨入渗, 不利于壤中流产流。当雨强较小时, 降雨以入渗为主, 径流基本以壤中流而非地表流损失。可见, 降雨量是壤中流的主控因子, 因此, 2003、2005 年降雨量偏小, 壤中流流量明显低于 2004 年。

3.2.2 典型壤中流产流过程分析 2003-06-24、2004-06-30 降雨量分别为 64.6、47.8mm, 均属大雨, 平均降雨强度分别为  $0.036$ 、 $0.072 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ , 壤中流流量分别为 36.8、23.2mm(图 3), 属本区典型降雨事件。分析其地表径流与壤中流产流过程, 发现二者差异明显。地表径流过程呈多峰, 而壤中流过程基本呈单峰, 壤中流产流明显滞后于地表径流, 而且产流时间长, 壤中流产流后, 地表径流量迅速下降甚至停止产流(见图 4)。这主要因地表径流

随瞬时雨强变化,而壤中流与雨强相关不显著,与土壤导水性质有关(Soulsby, et al. 2003)。前期降雨强度较大,地表径流迅速产生,一旦土壤水分蓄满,壤中流随即产生,随着降雨强度变小甚至降雨停止,地表径流让位于壤中流。2003-06-24 壤中流滞后地表流约 6h,2004-06-30 滞后 20min。其产流时间与降雨量、降雨强度和前期土壤湿度有关,2004-06-30

降雨前期整个土体(0~50cm 土层)土壤水分含量略高(图 4),土体水分蓄满所需时间更短,因此壤中流产流更快。壤中流持续时间较长,如 2003-06-24 的壤中流一直持续到降雨后第 4d,2004-06-30 壤中流产流持续 6h,与降雨历时长(9h)、平均降雨强度低和土壤蓄存水分的缓慢释放有关。

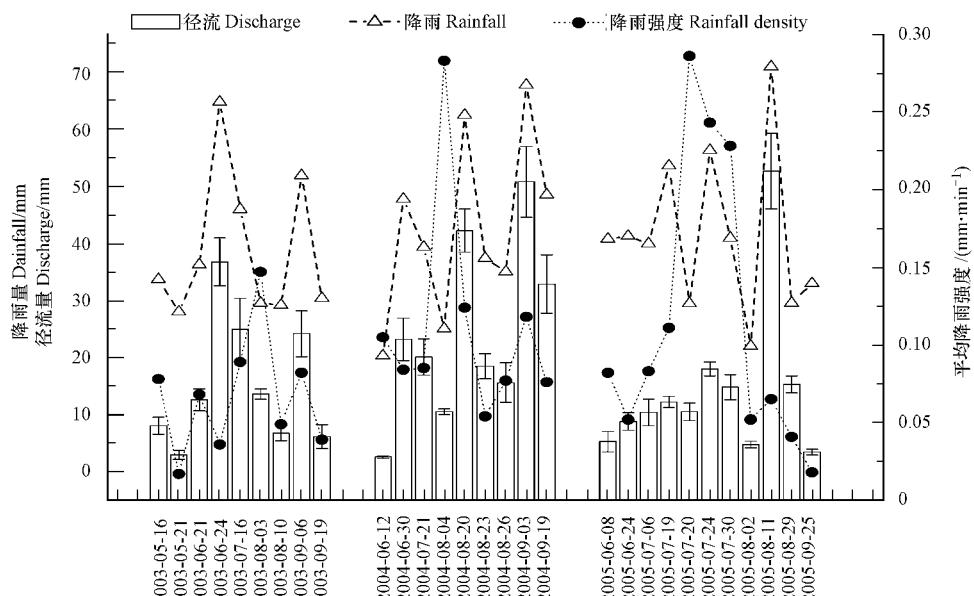


图 3 2003~2005 年壤中流径流量的年际变化

Fig. 3 Seasonal variation of subsurface flow from 2003 to 2005

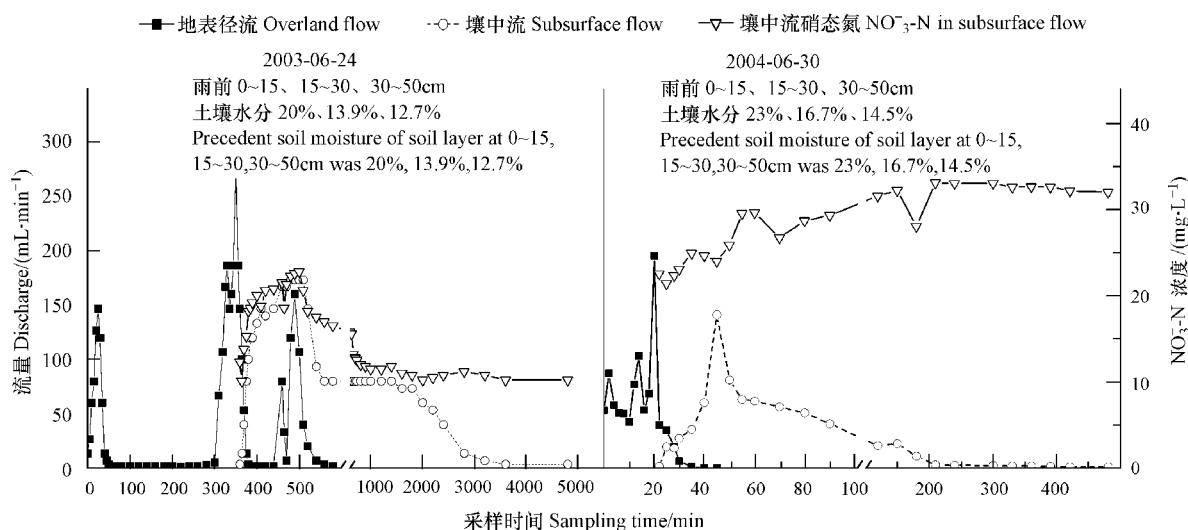


图 4 典型降雨事件中地表径流、壤中流过程及壤中流 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量变化

Fig. 4 Characteristics of overland flow and subsurface flow and variation of NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N content through subsurface flow in typical rainfall events

### 3.3 硝酸盐随壤中流淋失

#### 3.3.1 壤中流 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量特征 对 2003~2005

年历次降雨产流事件壤中流 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量分析表明(见图 5),紫色土坡地壤中流 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量一直较

高,在 $8.31 \sim 33.63 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,95%以上的壤中流 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量都在 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上。壤中流 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量的季节变化呈前期高,后期低的特点(见图5),主

要因旱季土壤硝酸盐的累积,随着雨季降雨及硝酸盐随壤中流的不断淋失,土体硝酸盐累积量下降,导致每年降雨后期壤中流含量降低。

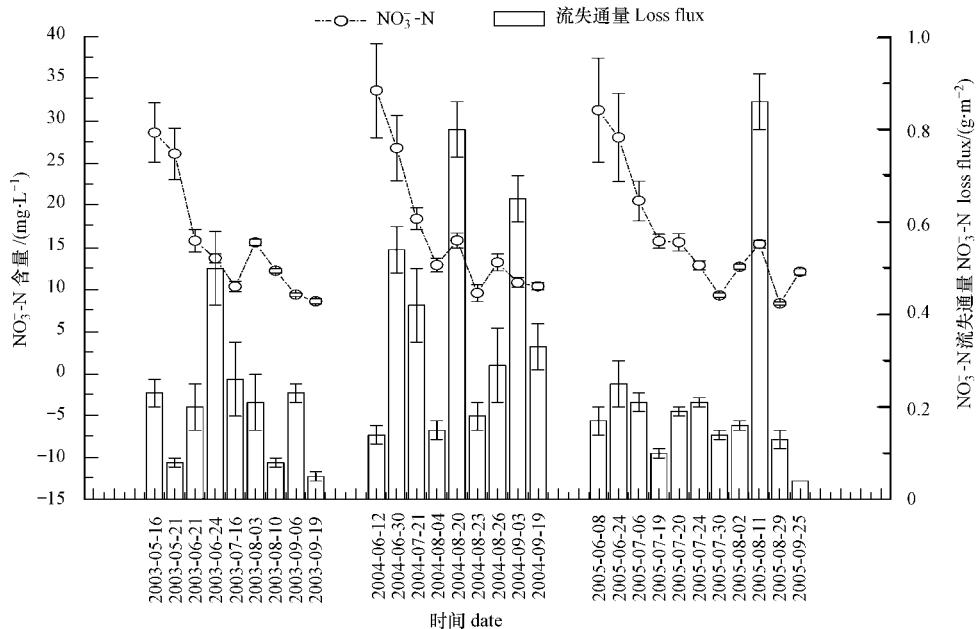


图5 2003~2005年历次壤中流 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量与流失通量

Fig. 5  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  content and loss flux at every subsurface flow event from 2003 to 2005

**3.3.2 壤中流过程中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量变化 分析典型降雨产流过程中壤中流 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量变化(见图4),两次壤中流过程中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量均较高,在 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上。其中,2003-06-24的壤中流 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 先升后降, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量峰值与壤中流流量峰值同步,原因可能是壤中流的稀释作用;而2004-06-30的壤中流硝态氮含量大都在 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上,且产流后期 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量不断升高,因本次降雨是当年第一场大降雨,旱季土壤剖面累积的大量硝酸盐使 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量较高且呈上升趋势,这也是2004-06-30的壤中流 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量远高于2003-06-24的原因。贾海燕等**

(2006)通过人工模拟降雨研究也得出类似的结果。

**3.3.3 壤中流 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的淋失负荷** 通过对紫色土坡地壤中流及其 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 迁移的长期观测与采样分析(见图5),发现紫色土壤中流极为发育,通过对历次壤中流流量的累加,得到2003~2005年的壤中流流量在 $136.3 \sim 216.5 \text{ mm}$ 之间,平均 $169.7 \text{ mm}$ ,平均径流系数 $20.20\%$ ,占夏季径流量的 $52.42\%$ (表2),在降雨强度较小的2005年,壤中流竟占到夏季径流的 $64.38\%$ 。同时,壤中流 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量普遍较高,因此硝酸盐随壤中流淋失非常突出,次降雨产流导致的淋失通量为 $0.04 \sim 0.86 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ,2003、2004、

表2 壤中流 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 淋失负荷  
Table 2 Loss flux of  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  through subsurface flow

年份 Year	降雨量 Rainfall /mm	壤中流 Subsurface flow			硝态氮淋失 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ Loss		
		流量 Discharge /mm	径流系数 Runoff coefficient	占雨季径流比例 Runoff ratio at rain season	$\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量 /( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	通量 flux /( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	占施氮比重 Ratio in fertilization N
2003	825.9	$136.3 \pm 22.1$	16.50%	40.26%	$12.59 \pm 3.52$	$18.89 \pm 4.36$	6.75%
2004	860.0	$216.5 \pm 28.4$	25.17%	52.62%	$15.82 \pm 3.37$	$36.97 \pm 8.22$	13.20%
2005	834.5	$156.3 \pm 20.7$	18.73%	64.38%	$16.35 \pm 5.43$	$28.19 \pm 7.28$	10.07%
平均	840.1	$169.7 \pm 23.7$	20.20%	52.42%	$14.92 \pm 4.82$	$27.98 \pm 6.62$	10.0%

2005年单次降雨的平均林失通量分别为0.20、0.39、0.23 g·m<sup>-2</sup>,2003~2005年NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N淋失负荷分别为18.89、36.97、28.19 kg·hm<sup>-2</sup>,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N淋失负荷的年际差异明显,主要是壤中流流量与浓度差异所致。3年NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N平均淋失负荷为27.98 kg·hm<sup>-2</sup>,可见,通过壤中流损失的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N可能是紫色土坡地氮素流失的主要途径。

此外,紫色土坡地NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N随壤中流淋失的季节变化明显(见表3),2004年NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N淋失主要集中到拔节和抽雄期,为25.72 kg·hm<sup>-2</sup>,约占全年NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N淋失量的69.6%,并与同期NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N累积量较少相呼应,这进一步说明硝酸盐随壤中流淋失的特点,同时也解释了紫色土坡地旱季硝酸盐累积,雨季迁移的原因。但与NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N累积量(见表1)相对比,我们发现随壤中流迁移的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N通量远低于土壤累积量,这主要是因为土壤硝酸盐累积量的变化,不仅与淋失有关,而且与作物吸收、土壤中生物化学转化有关(Stevenson,1982)。

表3 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N随壤中流迁移的季节变化(2004)

Table 3 Seasonal patterns of NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N movement through subsurface flow (2004)

玉米生育期 Bearing stage	壤中流流量 /mm	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N /(mg·L <sup>-1</sup> )	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N /(kg·hm <sup>-2</sup> )
四叶 Quatre-foil	2.6 ± 0.2	33.43 ± 5.61	1.40 ± 0.20
拔节 Jointing	53.8 ± 7.4	19.36 ± 2.03	12.35 ± 1.30
抽雄 Stamen growing	76.4 ± 9.5	12.86 ± 0.98	13.37 ± 1.26
成熟 Mature	50.8 ± 6.2	10.80 ± 0.56	6.57 ± 0.59
收获 Harvest	32.9 ± 5.1	10.36 ± 0.43	3.28 ± 0.51

#### 4 讨论(Discussion)

##### 4.1 紫色土坡耕地硝酸盐淋失机制

过量施肥导致土壤硝酸盐累积已成共识,紫色土坡耕地硝酸盐累积也是因农业偏施氮肥和过量施用氮肥造成的(朱波等,2006a)。但紫色土硝酸盐累积具有明显的季节变化趋势,旱季较高,雨季偏低,与北方旱地硝酸盐在土壤深层累积特点明显不同(胡春胜等,2002)。这与硝酸盐在土壤-水界面的相互作用及扩散迁移机制有关。众所周知,硝酸盐溶于水,其扩散迁移与土壤水分移动密不可分(White et al.,1996)。紫色土区降雨丰富,土壤质地疏松,孔隙发育,土壤导水率较高,同时,紫色土土层浅薄,雨季土壤水分极易蓄满,而下渗水很快抵达紫色土母质-母岩层,而透水性较弱的紫色泥页

岩,阻碍了水分继续下渗,迫使水分侧向移动形成壤中流,而紫色土岩层倾角大多在3~20°,势能作用及顺坡向水流不断叠加促进壤中流溢出,因此,紫色土坡地壤中流极为发育,年均流量(169.7 ± 23.7)mm,占雨季径流的52.42%,水分通过对土壤累积硝酸盐的溶解并汇入壤中流成为紫色土硝酸盐迁移的主要驱动力。紫色土旱季降雨量少,上年10月至次年5月降雨仅占全年30%左右,土壤下渗水不足以形成壤中流,土壤硝酸盐呈明显累积特点,这与北方硝酸盐累积机理无异,而雨季硝酸盐随壤中流迁移是其淋失的重要机制,也是紫色土坡地硝酸盐累积呈季节性差异的根本原因。国外同位素、小流域径流分割法也表明,坡地壤中流是硝酸盐淋失的主要机制(Hinkle et al.,2007;Silva et al.,2005)。

##### 4.2 壤中流流量对硝酸盐淋失负荷的影响

紫色土坡地硝酸盐淋失受壤中流驱动,壤中流流量的季节、年际变化特点是影响硝酸盐淋失负荷的重要因素。在2004年玉米拔节、抽雄期,壤中流流量分别为53.8、76.4 mm,分别占全年流量的24.8%和35.3%,而同期NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N淋失负荷分别为12.35、13.17 kg·hm<sup>-2</sup>,分别占年负荷的33.4%和35.6%。同时,壤中流流量由大到小的年份顺序为2004>2005>2003,这与NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N淋失负荷高低的年份顺序相同。此外,壤中流对硝酸盐淋失负荷的影响还在于其对土壤溶液硝酸盐的稀释作用上,2003~2005年前期壤中流NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量较高(见图5),其原因不仅与前期土壤累积硝酸盐较丰有关,而且还与壤中流流量较小有关。而每年降雨后期壤中流NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量降低则是壤中流的稀释作用增大所致。

##### 4.3 紫色土坡耕地硝酸盐淋失的环境风险

壤中流是紫色土区浅层地下水的主要水源,壤中流NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量较高并一直维持,2003、2004、2005历年平均含量分别为12.59、15.82、16.35 mg·L<sup>-1</sup>,3年含量平均值为14.92 mg·L<sup>-1</sup>,同时,迁移负荷高达27.98 kg·hm<sup>-2</sup>,这与坡耕地下的浅层井水NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N长期维持在较高水平(10 mg·L<sup>-1</sup>)相呼应(汪涛等,2006),表明硝酸盐随壤中流淋失必然导致紫色土区浅层地下水硝酸盐含量偏高。同时,由于壤中流作为径流的重要组成,将不断汇入溪流(Soulsby, et al., 2003),表现为小流域溪流NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量偏高(朱波等,2006b)。长江上游紫色土广泛分布,且大多为耕作土壤,而三峡库区及上游雨季硝酸盐随壤

中流大量淋失,汇入长江干流,硝酸盐污染的当地和异地效应突出,将加剧长江上游特别是三峡库区水环境压力。未来应加强紫色土坡地硝酸盐随壤中流迁移过程及其模拟研究,进一步评估硝酸盐淋失的环境效应,为保护长江上游特别是三峡库区水环境提供更为准确的科学数据。

## 5 结论(Conclusions)

1) 紫色土坡耕地土壤硝酸盐具有旱季累积、雨季淋失的特点,这实际上是硝酸盐在紫色土特定的土-水界面条件下的迁移的结果。

2) 紫色土坡耕地土壤累积的硝酸盐主要随壤中流迁移,壤中流迁移是硝酸盐淋失的主要机制。紫色土坡地壤中流极为发育,3年平均流量为( $169.7 \pm 23.7$ )mm,占雨季径流量的52.42%。随壤中流迁移的硝态氮含量持续偏高,平均( $14.92 \pm 4.82$ ) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,淋失负荷为( $27.98 \pm 6.62$ ) $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,占当年施肥量的10.0%,硝酸盐淋失存在明显的季节特点和年际差异。

3) 紫色土坡耕地硝酸盐淋失不仅造成当地浅层地下水硝酸盐污染和溪流硝酸盐含量偏高,影响当地水环境质量,而且可能加剧长江三峡库区水环境压力。

**责任作者简介:**朱波(1966—),男,研究员。主要从事土壤学、农业生态学和环境地球化学等方面的研究。已发表学术论文100多篇。E-mail: bzhu@imde.ac.cn。

## References:

- Armijo R. 1975. Epidemiology of stomach cancer in Chile—the role of nitrogen fertilizers [J]. *Int J Epidemiol*, (4):301—309
- Dorsch M M. 1984. Congenital malformations and maternal drinking water supply in rural South Australia: A case-control study [J]. *Am J Epidemiol*, 119:473—486
- Fu T, Ni J P, Wei C F, et al. 2003. Research on the nutrient loss from purple soil under different rainfall intensities and slopes [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 9(1):71—74 (in Chinese)
- Giles J. 2005. Nitrogen study fertilizes fears of pollution [J]. *Nature*, 433:791
- Haenszel W. 1976. Stomach cancer in Japan [J]. *J Natl Cancer Inst*, 56:265—274
- Hinkle S R, Bohlke J K, Duff J H, et al. 2007. Aquifer-scale controls on the distribution of nitrate and ammonium in ground water near La Pine, Oregon, USA [J]. *Journal of Hydrology*, 333 (2-4): 486—503
- Huang L, Ding S W, Dong Z, et al. 1998. Study on nutrient losses of purple soil in three gorges reservoir region [J]. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 4 (1): 8—13 (in Chinese)
- Hu C S, Cheng Y S, Li X X. 2002. Leaching loss of  $\text{NO}_3^-$ -N in farmland ecosystem of piedmont plain of Mt. Taihang [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 39(Supl):264—269 (in Chinese)
- Huang M X, Zhang S, Zhang G L. 2002. Nitrate leaching from a winter wheat/summer maize rotation in Beijing Area [J]. *Geographic Research*, 21(4): 425—433 (in Chinese)
- Jia H Y, Lei A L, Lei J S, et al. 2006. Nitrate-N loss effected by the runoff process in purple soil—a simulation study [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 26(10):1658—1664 (in Chinese)
- Li Z M. 1991. Purple soil in China (A) [M]. Beijing: Science Press, 1—11; 176—196 (in Chinese)
- Lu R K. 1999. Soil agro-chemical analysis methods [M]. Beijing: China Agro-science Press, 147—160 (in Chinese)
- Nelson D R, Biggar J W, Wierenga R J. 1982. Nitrogen transport processes in soils [M]. American Society of Agronomy, Inc. Madison, WI, 423—448
- Shepherd M A. 1996. Factors affecting nitrate leaching from sewage sludge applied to a sandy soil in arable agriculture [J]. *Agri Ecos Envir*, 58:171—185
- Silva R G, Holub S M, Jorgenson E E, et al. 2005. Indications of nitrate leaching loss under different land use of clayey and sandy soils in southeastern Oklahoma [J]. *Agr Ecost Envir*, 93:121—130
- Soulsby C, Petry C, Brewerb M J, et al. 2003. Identifying and assessing uncertainty in hydrological pathways: a novel approach to end member mixing in a Scottish agricultural catchment [J]. *J of Hydrology*, 274:109—128
- Stevenson F J. 1982. Nitrogen in Agricultural Soils [M]. American Society of Agronomy, Inc. Crop Science Society of America, Inc. Soil Science Society of America, Inc. Madison, WI, 167—190
- Sun B, Wang X X, Zhang T L. 2003. Influencing factors of leaching nutrients in red soils [J]. *Journal of Agro-environment Sciences*, 22 (3):257—262 (in Chinese)
- Wang J Y, Wang S J, Chen Y, et al. 1996. Study on the nitrogen leaching in rice fields [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 33(1): 28—36 (in Chinese)
- Wang T, Zhu B, Gao MR, et al. 2006. Nitrate pollution of groundwater in a typical small watershed in the central Sichuan hilly region [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 22 (3):84—87 (in Chinese)
- Wild A. 1972. Nitrate leaching under bare fellow at a sit in northern Nigeria [J]. *J Soil Sci*, 23:315—324
- White R E, Sharpley A N. 1996. The fate of non-metal contaminants in the soil environment. In: Naidu R, et al. (Ed.), *Contaminants and the Soil Environment in the Australasia-Pacific Region* [M]. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 29—68
- Xie H M, Zhu B, Zhu Z L. 2006. Temporal-spatial variation of ammonia and nitrate under application of inorganic and organic fertilizer—summer corn season [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 14 (2):103—106 (in Chinese)
- Xie X Q, Wang L J. 1998. Water Environment Observation and

- Analysis-Standard Methods for Observation and Analysis in Chinese Ecosystem Research Network [M]. Beijing: Standards Press of China, 104—279 (in Chinese)
- Xu F, Cai Q G, Wu S A, et al. 2002. Characteristics of erosion control by contour hedgerows on cultivated slope land of purple soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 39(1):71—80 (in Chinese)
- Young E O, Briggs R D. 2005. Shallow ground water nitrate-N and ammonium-N in cropland and riparian buffers [J]. *Agr Ecost Envir*, 109:297—309
- Zhang Q Z, Chen X, Shen S M. 2002. Advances in studies on accumulation and leaching of nitrate in farming soil [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 13 (2):233—238 ( in Chinese )
- Zhang W L, Tian Z X, Zhang N, et al. 1996. Nitrate pollution of groundwater in northern China [J]. *Agri Ecos Envir*, 59 (3) : 223—231
- Zhang X C, Shao M A. 2000. The interacting models and mechanisms of soil nitrogen with rainfall and runoff [J]. *Progress in Geography*, 19 (2):128—135 ( in Chinese )
- Zhong X H. 2000. Montology Outline and Mountain Research in China [M]. Chengdu:Sichuan Science and Technology Press, 1—3 ( in Chinese )
- Zhu B, Peng K, Xie H M. 2006a. Nitrogen balance of agro-ecosystem in a typical watershed in the hilly area of central Sichuan Basin [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 14 ( 1 ): 108—111 ( in Chinese )
- Zhu B, Wang T, Xu T P, et al. 2006b. Non-point-source nitrogen movement and its environmental effects in a small watershed in hilly area of purple soil [J]. *Journal of Mountain Science*, 24(5):601—606 ( in Chinese )
- Zhu Z L, Wen Q X. 1994. Soil Nitrogen in China [M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1—9 ( in Chinese )
- 中文参考文献:**
- 傅涛,倪九派,魏朝富,等.2003.不同雨强和坡度条件下紫色土养分流失规律研究 [J].*植物营养与肥料学报*,9(1):71—74
- 黄丽,丁树文,董舟,等.1998.三峡库区紫色土养分流失的试验研究 [J].*土壤侵蚀与水土保持学报*,4(1):8—13
- 胡春胜,程一松,胡晓欣.2002.太行山前平原农田生态系统中硝态氮的淋失研究[J].*土壤学报*,39(增刊):264—269
- 黄满湘,章申,张国梁. 2002. 北京地区冬小麦/夏玉米连作条件下硝态氮淋失[J]. 地理研究,21(4)425—433
- 贾海燕,雷阿林,雷俊山,等.2006.紫色土地区水文特征对硝态氮流失的影响研究[J].*环境科学学报*,26(10):1658—1664
- 李仲明.1991.中国紫色土(上篇)[M].北京:科学出版社,1—11; 176—196
- 鲁如坤.1999.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业出版社, 147—160
- 孙波,王兴祥,张桃林.2003.红壤养分淋失的影响因子[J].*农业环境科学学报*,22(3):257—262
- 王家玉,王胜佳,陈义,等.1996.稻田土壤中氮素淋失的研究[J].*土壤学报*,33(1):28—36
- 汪涛,朱波,高美荣,等.2006.川中丘陵区典型小流域地下水硝酸盐污染分析[J].*生态与农村环境学报*,22(3):84—87
- 谢红梅,朱波,朱钟麟.2006.无机与有机肥配施下紫色土铵态氮、硝态氮的时空变异研究—夏玉米季[J].*中国生态农业学报*,14 (2):103—106
- 谢贤群,王立军.1998.中国生态系统研究网络观测与分析标准方法——水环境要素观测与分析[M].北京:中国标准出版社, 104—279
- 许峰,蔡强国,吴淑安,等.2002.高植物篱控制紫色土坡耕地侵蚀的特点[J].*土壤学报*,39(1):71—80
- 张庆忠,陈欣,沈善敏.2002.农田土壤硝酸盐积累与淋失研究进展 [J].*应用生态学报*, 13(2):233—238
- 张兴昌,邵明安.2000.坡地土壤氮素与降雨、径流的相互作用机理及模型[J].*地理科学进展*,19(2):128—135
- 钟祥浩. 2000. 山地学概论与中国山地研究[M]. 成都: 四川科学技术出版社,1—3
- 朱波,彭奎,谢红梅. 2006a. 川中丘陵区典型小流域农田生态系统氮素收支[J]. *中国生态农业学报*,14(1):108—111
- 朱波,汪涛,徐泰平,等.2006b.紫色丘陵区典型小流域氮素迁移及其环境效应[J].*山地学报*,24(5):601—606
- 朱兆良,文启孝. 1994. 中国土壤氮素[M]. 南京: 江苏科学技术出版社,1—9