

# 丹江口库区典型坡面不同土地利用硝态氮水平运移特征

吴 薇<sup>1</sup>, 姚 娜<sup>1</sup>, 赵书华<sup>2</sup>, 郭忠录<sup>2</sup>

(1. 湖北安源安全环保科技有限公司, 武汉 430040; 2. 华中农业大学 水土保持研究中心, 武汉 430070)

**摘 要:**利用水分扩散装置对丹江库区典型坡面 4 个土地利用 3 个土层的硝态氮水平运移规律进行了研究。结果表明:硝态氮水平运移速率随距离增加而迅速减小,呈幂函数曲线降低。由于人为扰动及水土流失作用各土层性质不同,硝态氮运移曲线发生分异,河漫滩和柑橘园地在距离 20 cm 后趋于平稳,而消落区撂荒地和库滨带坡耕地在 35 cm 后才趋于平稳;消落区撂荒地和库滨带坡耕地土壤硝态氮运移速率随着土壤深度增加逐渐减小,而河漫滩和柑橘园地表现为相反趋势。硝态氮浓度最大值均出现在湿润锋(土壤干湿交界面)上;硝态氮水平运移浓度随土壤含水量的增加而减小,变化趋势符合幂函数关系。

**关键词:**硝态氮;水平运移;土地利用方式;土壤水分;丹江口水库

中图分类号:S153.6<sup>+</sup>1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2015)01-0033-05

## Characteristics of Nitrate Horizontal Transport in Soils from Different Land Uses in Danjiangkou Reservoir

WU Wei<sup>1</sup>, YAO Na<sup>1</sup>, ZHAO Shuhua<sup>2</sup>, GUO Zhonglu<sup>2</sup>

(1. Hubei Anyuan Safety and Environmental Protection Technology Co., Ltd., Wuhan 430040, China;

2. Research Center for Soil & Water Conservation, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** The horizontal transport of nitrate in soils from different land use along an altitudinal transect in Danjiangkou Reservoir was studied. The results were as follows. The horizontal transport velocity of nitrate decreased with increase of transport distance as power function. Due to soil properties from different land use, the curves of horizontal transport of nitrate were different; the horizontal transport velocity of nitrate from floodplain and citrus orchard was stable beyond 20 cm, and was stable beyond 35 cm for abandoned land in hydro-fluctuation belt and slope land in riparian buffer strips; the horizontal transport velocity of nitrate for abandoned land in hydro-fluctuation belt and slope land in riparian buffer strips decreased gradually with soil depth, and the opposite trend was observed for floodplain and citrus orchard. Transport concentration of nitrate reached to maximum value at the surface of wetting front which occurred on the interface between wet and dry soil; nitrate transport concentration decreased with increase of the soil moisture content and their relation could be fitted by power curve.

**Keywords:** nitrate; horizontal transport; land use; soil moisture; Danjiangkou Reservoir

丹江口水库分布于河南省淅川县和湖北省丹江口市之间,主要由汉江库区和丹江库区组成,是我国南水北调中线工程的水源区。南水北调中线工程要求水源地丹江口水库的水质要达到国家地表水类以上的水质标准(GB3838—2002)。根据 1995—2009 年水质监测资料,丹江口水库总体水质良好,部分区域和支流水质总氮总磷指标超过或接近Ⅱ类水质标准<sup>[1]</sup>。丹江口水库流域内属于农业主产区,种植业占农业总产值的 55%<sup>[2]</sup>。为了增加产出,农业生产过

程中投入了大量农业生产资料,这可能是近年来库区部分区域和支流水质超标的重要原因。

国内外研究结果表明农业非点源污染是湖库水体富营养化的主要原因<sup>[3-7]</sup>。农田土壤中氮磷的流失是造成地表水体富营养化的决定性因素,降水条件下过量的氮素随地表径流流失是旱地农田氮素损失的重要途径,而硝态氮被发现是地表径流氮流失的最主要形态<sup>[8-10]</sup>。鉴于此,本研究基于库区坡地氮流失及引发的湖库富营养化问题,借鉴现有研究方法<sup>[11]</sup>,以

收稿日期:2013-11-25

修回日期:2014-01-15

资助项目:国家自然科学基金(40901132);中央高校基本科研业务费专项资金(2013JC013)

第一作者:吴薇(1981—),女,湖北孝感人,硕士,研究方向:水土保持与非点源污染控制。E-mail:wuweih2013@126.com

通信作者:郭忠录(1980—),男,山西定襄人,副教授,主要从事水土保持与农业生态方面研究。E-mail:zlguo2007@126.com

水库生态屏障带典型坡面不同土地利用方式为研究对象,以硝酸盐溶液为示踪剂,比较研究土壤硝酸盐水平运移规律以及空间变化过程,以期为库区水土保持、水质安全及土地管理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 土壤样品采集

前期调查发现,丹江口库区库周土地利用模式从坡脚到坡顶主要为:河漫滩—撂荒地/草地—坡耕地/草地—坡耕地/撂荒地—柑橘园地—灌木林地。考虑库岸水文情势,本研究从坡脚到坡顶,在消落带生态恢复区(河漫滩 DS<sub>1</sub>,撂荒地/草地 DS<sub>2</sub>)、库滨缓冲区(坡耕地/草地 DS<sub>3</sub>)和生态农业区(柑橘园地 DS<sub>4</sub>) 4 个区域采用“S”形法分层采集土壤样品,层次为 0—5 cm, 5—15 cm, 15—25 cm, 每种土地利用采集 10 个样点。土壤样品混合后带回实验室,一部分风干,剔除杂质,研磨过 2 mm 筛和 0.149 mm 筛,测定土壤基本性质见表 1;另一部分用蒸馏水清洗,直至可溶性的硝酸根离子完全清除为止,然后风干,研磨过 2 mm 筛,备用。

样品采集于 2011 年 6 月,消落区河漫滩有少量草本植物,消落区撂荒地近年来种植过油菜和玉米,库滨缓冲区耕地种有芝麻,生态农业区下部分种有玉米和上部分栽植柑橘。由于水库的反季节性调度,河漫滩夏季出露、冬季淹没,库滨缓冲区处于高水位临界区,主要受生态农业区降水的影响。

### 1.2 硝态氮水平运移试验

借鉴国内外硝态氮水平运移研究装置,本研究水平扩散装置规格:100 cm(长)×15 cm(宽)×10 cm(高),材料为有机玻璃,由马氏瓶、水平槽组成。槽体分为三部分:水室段(10 cm)、石英砂滤层段(10 cm)和土样段(80 cm)组成。

根据野外测定土壤容重装填土柱,100 mg/L 的

硝酸盐溶液作为示踪剂,马氏瓶控制恒定水头。溶液在运移过程中忽略水平方向上的重力势,土壤层中干土和湿土之间的硝酸盐浓度水势和基质势是水平土柱中硝酸盐运移的推动力。

在水平土柱上标记刻度,当土柱湿润到 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm, 30 cm, 35 cm, 50 cm 时,记录达到该刻度所用的时间,土柱湿润到 50 cm 时,停止加入硝酸盐溶液。将土柱分成 2 cm 长的小段,每段分成 4 份,2 份测定土壤湿度,2 份测定硝态氮含量。测定值减去背景值,得到吸附或解吸的量。硝态氮的运移速度通过溶液运移时间和扩散距离获取。4 个土地利用 3 个土层,每层土壤样品重复 2 次。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤基本性质

地形部位和土地利用方式对土壤性质沿垂直剖面的分布具有重要影响(表 1)。从下坡位至上坡位,土壤有机质含量呈现先增加后减少的趋势,最大值出现在库滨缓冲区坡耕地上(DS<sub>3</sub>),0—5 cm 土层有机质量含量为 8.67 g/kg,河漫滩有机质量含量最低 6.75 g/kg,消落区撂荒地(DS<sub>2</sub>)和生态农业区(柑橘园地)土壤有机质量含量介于之间,为 7.89, 7.42 g/kg。沿坡面从下往上,土壤容重没有明显的变化趋势,但 5—15 cm 和 15—25 cm 土层中坡位和上坡位明显高于下坡位。沿着坡面向上,DS<sub>1</sub> 和 DS<sub>2</sub> 三个土层土壤砂粒含量均明显高于 DS<sub>3</sub> 和 DS<sub>4</sub>,而粉粒和黏粒含量呈现相反的趋势。从 0—5 cm 到 15—25 cm 土层,4 种土地利用土壤有机质量均随着土层深度增加而减少,而土壤容重表现为 5—15 cm 和 15—25 cm 土层高于表层,土壤粒径分布随着土层深度增加没有明显的变化趋势,土壤孔隙度除河漫滩(DS<sub>1</sub>)外,基本呈现土壤深度增加减小的趋势。

表 1 土壤基本性质

土样	深度/cm	容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	有机质/ (g·kg <sup>-1</sup> )	孔隙度/%	砂粒/ (g·kg <sup>-1</sup> )	粉粒/ (g·kg <sup>-1</sup> )	黏粒/ (g·kg <sup>-1</sup> )
DS <sub>1</sub>	0—5	1.26	6.75	46.3	455	307	238
	5—15	1.43	3.42	41.5	457	322	221
	15—25	1.36	3.21	49.3	481	316	203
DS <sub>2</sub>	0—5	1.12	7.89	52.5	495	302	203
	5—15	1.65	5.67	33.7	484	291	225
	15—25	1.56	4.69	39.1	460	314	226
DS <sub>3</sub>	0—5	1.31	8.67	47.5	377	395	228
	5—15	1.55	7.78	40.6	337	398	265
	15—25	1.57	6.78	40.1	346	408	246
DS <sub>4</sub>	0—5	1.32	7.42	50.1	373	398	229
	5—15	1.55	6.98	42.6	325	407	268
	15—25	1.56	6.31	41.9	360	382	259

## 2.2 硝态氮水平运移特征

在整个硝态氮水平运移试验过程中,硝态氮溶液在水平土槽中作水平运移,利用马氏瓶来控制恒定水头,消除重力势和压力势的影响。硝态氮溶液在水平土槽中做水平运移时,忽略各质点之间的重力势差,可以认为硝态氮水平运移的推动力主要是硝态氮的浓度梯度、土壤的基质势和干湿土层之间的水势梯度。

硝态氮浓度随着运移距离的增加而降低,DS<sub>1</sub>, DS<sub>2</sub>, DS<sub>3</sub> 和 DS<sub>4</sub> 四种土地利用 3 个土层趋势相似,呈对数衰减(图 1)。统计分析可知,硝态氮浓度与运移距离表现为极显著相关关系。DS<sub>1</sub> 的 0—5 cm, 5—15 cm 和 15—25 cm 3 个土层相关系数分别为  $r=0.9311^{**}$ ,  $r=0.8735^{**}$ ,  $r=0.8367^{**}$ ,  $n=22$ 。

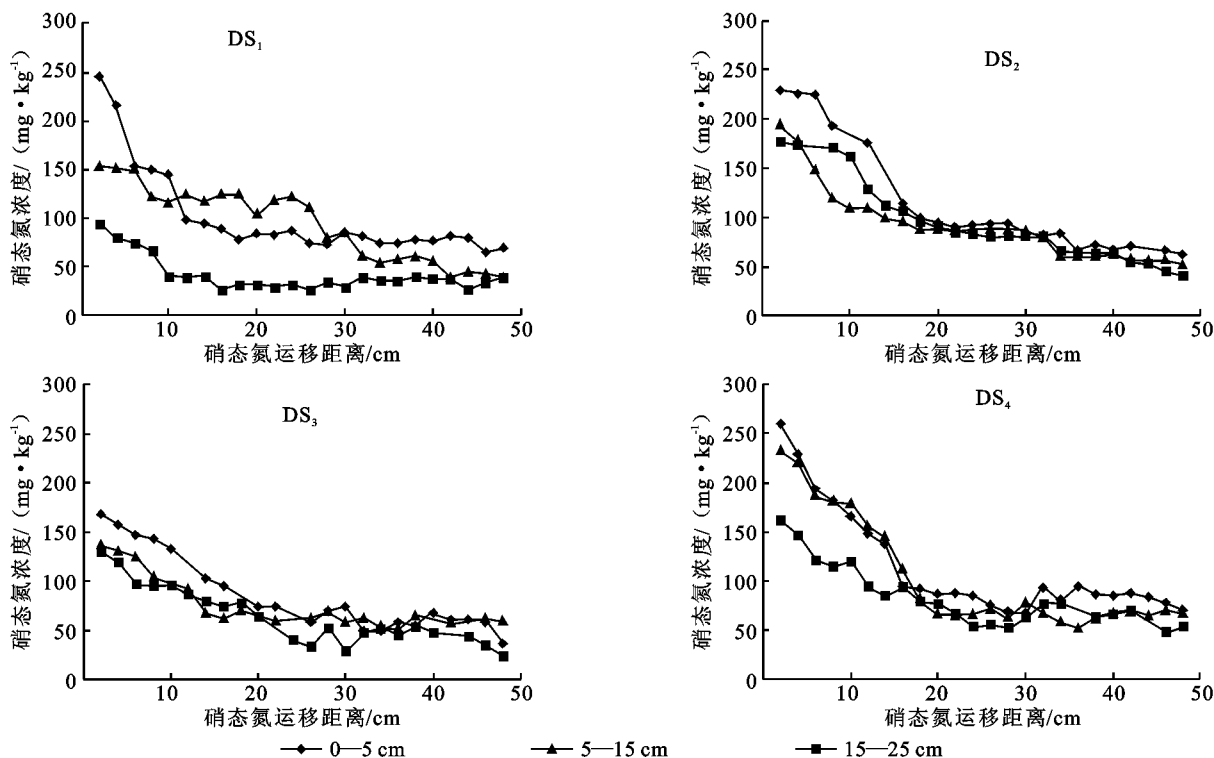


图 1 不同运移距离硝态氮浓度变化

## 2.3 硝态氮水平运移速率与运移距离的关系

硝态氮水平运移的推动力主要是干湿土层之间的水势梯度和土壤基质势<sup>[12]</sup>。在硝态氮水平运移过程中,其运移速率与运移距离并不是直线线性关系,而是呈现幂函数关系(图 2)。回归分析知,DS<sub>1</sub>, DS<sub>2</sub>, DS<sub>3</sub> 和 DS<sub>4</sub> 四种土地利用 3 个土层深度硝态氮运移速率与运移距离的相关关系均达到了极显著水平,  $r$  值均在 0.90 以上。各层中硝态氮运移速率均表现为短距离(0—5 cm)运移速率最大,随着距离的增加,运移速率迅速下降。DS<sub>1</sub> 和 DS<sub>4</sub> 的 3 个土层在 20 cm 以后,随着运移距离增加,硝态氮水平运移速率基本接近并开始聚集;而 DS<sub>2</sub> 和 DS<sub>3</sub> 各土层直到 35 cm 以

DS<sub>2</sub> 的 3 个土层相关系数依次为  $r=0.9607^{**}$ ,  $n=19$ ;  $r=0.9798^{**}$ ,  $n=21$ ;  $r=0.8724^{**}$ ,  $n=22$ 。DS<sub>3</sub> 的 3 个土层相关系数依次为  $r=0.9618^{**}$ ,  $n=19$ ;  $r=0.9370^{**}$ ,  $n=18$ ;  $r=0.9230^{**}$ ,  $n=21$ 。DS<sub>4</sub> 的 3 个土层相关系数为  $r=0.9455^{**}$ ,  $n=22$ ;  $r=0.9423^{**}$ ,  $n=22$ ;  $r=0.9439^{**}$ ,  $n=21$ ,由图 1 还可以看出,DS<sub>1</sub> 的 0—5 cm, 5—15 cm 和 15—25 cm 3 个土层硝态氮浓度在整个运移过程中差异较大,而 DS<sub>2</sub>, DS<sub>3</sub> 和 DS<sub>4</sub> 在运移至 15 cm 左右,3 个土层土壤硝态氮浓度趋于相近。值得注意的是 DS<sub>1</sub> 的 15—25 cm 土层与 DS<sub>3</sub> 的 5—15 cm 和 15—25 cm 土壤硝态氮浓度运移至 20 cm 时浓度均低于其他处理,且低于 150 mg/kg。

后,运移速率的变化趋于缓慢,且没有像 DS<sub>1</sub> 和 DS<sub>4</sub> 随着运移距离增加逐步聚集。由于沿着坡面不同土地利用不同层次土壤物理性状差异,硝态氮运移曲线发生了分异,DS<sub>1</sub> 土壤中硝态氮运移速率大小依次为:15—25 cm > 5—15 cm > 0—5 cm, DS<sub>2</sub> 和 DS<sub>3</sub> 土壤硝态氮运移速率随着土层深度的增加逐渐减小,DS<sub>4</sub> 土壤中硝态氮运移速率大小趋势基本与 DS<sub>1</sub> 一致。

## 2.4 土壤湿度对硝态氮水平运移浓度的影响

土壤含水量对硝态氮水平运移速率有较大的影响<sup>[12-13]</sup>,本研究中四种土地利用 3 个土层土壤硝态氮运移浓度均随土壤含水量增加而减小(图 3)。当土壤含水量低于 0.3 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> 时,硝态氮的浓度变化较大,但土壤含水量大于 0.3 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> 到接近土壤水

分饱和时,硝态氮浓度变化较小。4 种土地利用各土层之间的浓度值有差异,但变化趋势基本一致,曲线呈负幂函数( $y=ax^b$ )变化,硝态氮运移浓度与土壤含水量相关关系达到了极显著水平。

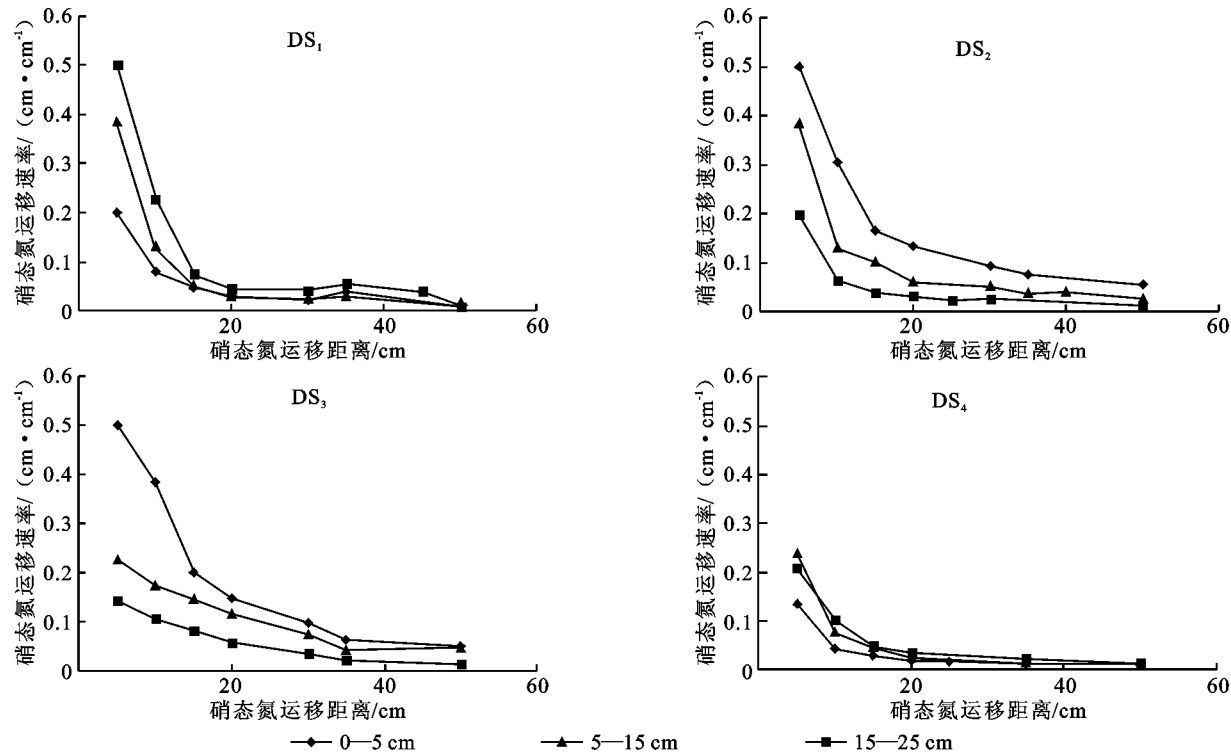


图 2 硝态氮水平运移速率与运移距离的关系

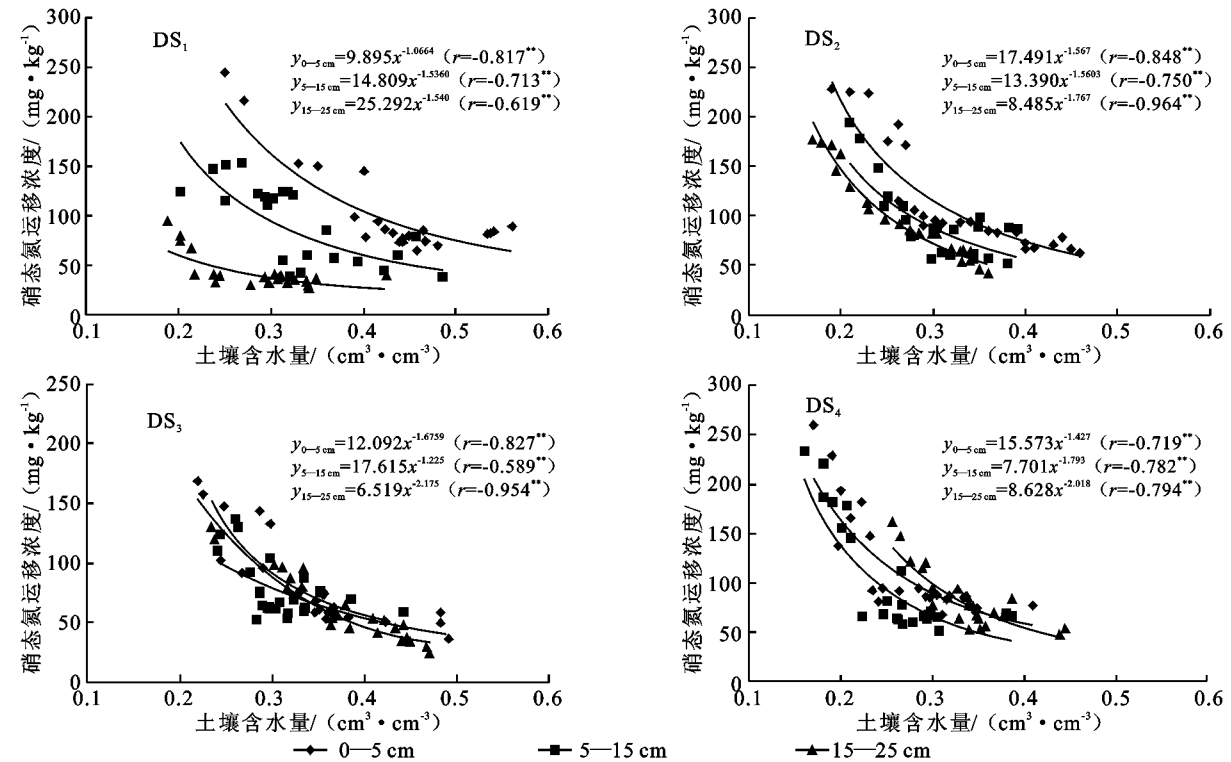


图 3 土壤含水量对硝态氮水平运移浓度的影响

硝酸盐离子在随水分迁移过程中,具有很强的移动性,在其浓度梯度和水势梯度的影响下,在水分所到达的干湿界面(湿润峰面)上富集,浓度在湿润峰面上达到最大值。不同土地利用各土层湿润峰处最

大值:河漫滩(DS<sub>1</sub>)244.91 mg/kg(0—5 cm),153.32 mg/kg(5—15 cm),93.97 mg/kg(15—25 cm);撂荒地(DS<sub>2</sub>)228.53 mg/kg,194.59 mg/kg,177.02 mg/kg。坡耕地(DS<sub>3</sub>)168.38,137.02,129.46 mg/kg。

柑橘园(DS<sub>1</sub>)259.69,233.65,162.04 mg/kg。

### 3 讨论

山地坡面地形部位和土地利用方式综合影响着土壤的物理化学性质包括对干扰扩散的影响,对水土流失和养分流失的影响。研究认为水土流失作用下,下坡位是坡面养分的汇集处,养分含量高于中坡位和上坡位<sup>[14]</sup>。Gregorich 和 Anderson 发现土壤有机质含量从坡顶到坡脚逐渐增加<sup>[15]</sup>。本研究结果有所不同,下坡位河漫滩有机质最低,这主要是水库蓄水时该区侵蚀沉积泥沙养分释放到水体造成的。中坡位的消落区撂荒地和库滨带坡耕地较高有机质含量更多是前期农业种植施肥的结果,而上坡位柑橘园地较低的含量可能是开垦种植时间较短且肥料投入较少造成的,进一步证实了土壤养分在不同坡位的含量更取决于土地利用方式差异。

硝态氮是一种非专性吸附阴离子,通过静电力与土壤胶体双电层外层发生作用,通常情况下不易被带负电的土壤胶体所吸附,主要以溶质的形式存在于土壤溶液中,其运移速率随土壤含水量的不同而相应地变化着<sup>[12]</sup>。本研究中土壤含水量显著影响到硝态氮水平运移速率和运移浓度,当土壤含水量低于 0.3 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> 时,硝态氮浓度变化较大,但土壤含水量接近饱和时,硝态氮浓度变化无明显变化。杜臻杰等<sup>[16]</sup>对典型红壤旱地硝态氮水平运移规律研究结果表明,当土壤含水量小于 0.1 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> 时,硝态氮水平运移速率随土壤含水量增加缓慢增加;大于 0.1 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> 时,硝态氮水平运移速率随土壤含水量增加而急剧增加。Chen 等<sup>[11]</sup>对水稻土研究表明,当土壤含水量小于 0.5 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> 时,硝态氮运移浓度缓慢变化,而土壤含水量大于 0.5 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> 时,硝态氮运移浓度对含水量变化剧烈。这主要是不同土壤类型土壤物理化学性质迥异,从而会影响到硝态氮运移浓度。

本试验中河漫滩土壤中硝态氮运移速率随着土壤深度的增加而逐渐增大,柑橘园地土壤中硝态氮运移速率大小趋势基本与河漫滩一致;而消落区撂荒地和库滨带坡耕地土壤硝态氮运移速率随着土壤深度的增加逐渐减小。河漫滩 0—5 cm 土层黏粒含量较高,相对粘重;黏粒遇水膨胀,其膨胀结果影响了水分在土壤中的分配;柑橘园地长期未翻耕影响到沙粒级配分布,从而影响了硝态氮运移速率;与其他研究相似,消落区撂荒地和库滨带坡耕地表层的运移速度最大,主要受土壤孔隙大小和土粒之间的水势梯度影响,且随土壤深度增加,土壤质地越紧实,溶液运移速度越小<sup>[11-13]</sup>。这也进一步证实了硝态氮的运移速率

大小还和对土壤水分含量有影响的土壤质地类型和土壤有机质含量等有关。

### 4 结论

(1) 沿着坡面的 4 个土地利用 3 个层次土壤硝态氮运移速率有所不同,但总体变化趋势一致;土壤中硝态氮水平运移速率和运移距离的关系呈现出幂函数关系,随着运移距离增加而减小,且均达到了极显著水平。

(2) 土壤物理性质影响了土壤中硝态氮运移速率。沿着坡面从坡脚向上,河漫滩土壤硝态氮运移速率 15—25 cm > 5—15 cm > 0—5 cm,消落区撂荒地和库滨带坡耕地土壤硝态氮运移速率随着土层深度增加逐渐减小,柑橘园与河漫滩基本一致。

(3) 在水平运移过程中,硝酸盐浓度在土壤的湿润峰面上达到最大值;随土壤含水量的增加而减小,变化趋势符合负幂函数关系,相关关系极显著;土壤含水量 0.3 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> 是为一个分界线,当土壤含水量大于 0.3 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> 至接近土壤水分饱和时,硝态氮浓度变化较小;当土壤含水量小于 0.3 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> 时,浓度变化较大。

#### 参考文献:

- [1] 姜世英,韩鹏,贾振邦,等.南水北调中线丹江口库区农业面源污染 PSR 评价与基于 GIS 的空间特征分析[J].农业环境科学学报,2010,29(11):2153-2162.
- [2] 申怀飞,侯刚,魏庆伟,等.南水北调中线水源区土地利用覆被空间格局特征分析[J].水土保持研究,2013,20(6):209-212.
- [3] 张维理,武淑霞,冀宏杰,等.中国农业面源污染的形势估计及控制对策. I: 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J].中国农业科学,2004,37(7):1008-1017.
- [4] Carpenter S R, Caraco N F, Correll D L, et al. Non-point pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen [J]. Ecological Applications,1998,8(3):559-568.
- [5] Azzellino A, Salvetti R, Vismara R, Bonomo L. Combined use of the EPA-QUAL2E simulation model and factor analysis to assess the source apportionment of point and nonpoint loads of nutrients to surface waters [J]. Science of the Total Environment,2006,371(1/3):214-222.
- [6] 高松峰,杨倩琪.前置库净化系统中水生植物的选择[J].水土保持研究,2013,20(6):182-187.
- [7] 刘世斌,李江风,劳燕玲,等.梁子湖生态屏障区土地利用模式研究[J].水土保持研究,2013,20(4):218-223.

## 参考文献:

- [1] 陈晓安,蔡强国,张利超,等. 黄土丘陵沟壑区不同雨强下坡长对坡面土壤侵蚀的影响[J]. 土壤通报,2011,42(6):721-725.
- [2] 孙文义,郭胜利. 黄土丘陵沟壑区小流域土壤有机碳空间分布及其影响因素[J]. 生态学报,2011,31(6):1604-1616.
- [3] 张岩,刘宪春,李智广,等. 利用侵蚀模型普查黄土高原土壤侵蚀状况[J]. 农业工程学报,2012,28(10):165-171.
- [4] 魏霞,李占斌,李勋贵. 黄土高原坡沟系统土壤侵蚀研究进展[J]. 中国水土保持科学,2012,10(1):108-113.
- [5] Liu Y, Fu B, Lü Y, et al. Hydrological responses and soil erosion potential of abandoned cropland in the Loess Plateau, China[J]. Geomorphology, 2012, 138(1): 404-414.
- [6] 孔亚平,张科利,唐克丽. 坡长对侵蚀产沙过程影响的模拟研究[J]. 水土保持学报,2001,15(2):17-24.
- [7] Chirino E, Bonet A, Bellot J, Sánchez J R. Effects of 30-year-old Aleppo pine plantations on runoff, soil erosion, and plant diversity in a semi-arid landscape in south eastern Spain[J]. Catena, 2006, 65(1): 19-29.
- [8] 张丽萍,倪含斌,吴希媛. 黄土高原水蚀风蚀交错区不同下垫面土壤水蚀特征试验研究[J]. 水土保持研究, 2005, 12(5): 126-127.
- [9] 田凤霞,王占礼,牛振华,等. 黄土坡面土壤侵蚀过程试验研究[J]. 干旱地区农业研究,2005,18(6):141-146.
- [10] 伍飞舟,杨卓,牛健植,等. 黄土高原丘陵沟壑区土地利用与水土保持措施的变化特征[J]. 水土保持研究, 2010, 17(2): 11-19.
- [11] 卫伟,陈利顶,傅伯杰,等. 半干旱黄土丘陵沟壑区降水特征值和下跌面因子影响下的水土流失规律[J]. 生态学报,2006,26(11):3847-3853.
- [12] 黄秉维,郑度,赵名茶,等. 现代自然地理[M]. 北京:科学出版社,1999.
- [13] 邓成龙,袁宝. 印末次间冰期以来黄河中游黄土高原沟谷侵蚀:堆积过程初探[J]. 地理学报,2001,56(1):92-98.
- [14] 王光谦,李铁键,贺莉,等. 黄土丘陵沟壑区沟道的水沙运动模拟[J]. 泥沙研究,2008(3):19-25.
- [15] 刘万青,张超超,王旭红,等. 高线图形概括在黄土高原沟谷侵蚀量估算中的应用[J]. 水土保持通报,2011,31(1):128-131.
- [16] 穆少杰,李建龙,陈奕兆,等. 2001—2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征[J]. 地理学报,2012,67(9):1255-1268.
- [17] 庞吉林,张克斌,乔娜,等. 基于 RS 的盐池县近 10 年植被覆盖度动态变化研究[J]. 水土保持研究,2012,19(4):112-115.
- [18] 王天巍,史志华,李朝霞,等. 基于多源数据的三峡库区乐天溪流域林地植被覆盖动态监测[J]. 应用生态学报,2008,18(11):2533-2539.
- [19] Montgomery D R, Foufoula-Georgiou E. Channel network source representation using digital elevation models[J]. Water Resources Research, 1993, 29(12): 3925-3934.
- [20] Zhu T X. Spatial variation and interaction of runoff generation and erosion within a semi-arid, complex terrain catchment: a hierarchical approach[J]. Journal of Soils and Sediments, 2013, 13(10): 1770-1783.
- [21] 王福堂,蔡强国, Luk S. 晋西黄土高原土壤侵蚀管理与地理信息系统应用研究[M]. 北京:科学出版社,1992.
- [22] 王福堂,王贵平. 王家沟流域水土保持综合治理动态监测与效益评价[J]. 山西水土保持科技,1995(3):2-8.

(上接第 37 页)

- [8] Hutson J L, Cass A. A retentivity function for use in soil water simulation models[J]. Journal of Soil Science, 1987, 38(1): 105-113.
- [9] 陈利顶,傅伯杰. 农田生态系统管理与非点源污染控制[J]. 环境科学,2000,21(3):98-100.
- [10] 张福珠,熊先哲,戴同顺,等. 应用<sup>15</sup>N 研究土壤—植物系统中氮素淋失动态[J]. 环境科学,1984,5(1):21-24.
- [11] Chen X M, Shen Q R, Pan G X, et al. Characteristics of nitrate horizontal transport in a paddy field of the Tai Lake region, China[J]. Chemosphere, 2003, 50(6): 703-706.
- [12] 陈效民,邓建才,张佳宝,等. 黄淮海平原主要土类中硝态氮水平运移规律[J]. 环境科学,2002,23(5):96-99.
- [13] 邓建才,陈效民,柯用春,等. 土壤水分对土壤中硝态氮水平运移的影响[J]. 中国环境科学,2004,24(3):280-284.
- [14] 高雪松,邓良基,张世熔. 不同利用方式与坡位土壤物理性质及养分特征分析[J]. 水土保持学报,2005,19(2):53-56.
- [15] Gregorich E G, Anderson D W. Effects of cultivation and erosion on soils of four toposequences in Canadian prairies[J]. Geoderma, 1985, 36(3/4): 343-354.
- [16] 杜臻杰,陈效民,方堃,等. 典型红壤旱地硝态氮水平运移规律的研究[J]. 土壤通报,2009,40(6):1349-1352.