

黄土坡地几种退耕植被土壤硝态氮分布特征与迁移研究

张宇¹, 张海^{1*}, 齐雁冰¹, 郝月姣¹, 柏延芳²

(1.西北农林科技大学资源环境学院 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2.新疆建设兵团农四师建设工程交易中心, 新疆 伊宁 835000)

摘要:以荒坡地为对照,研究了黄土高原退耕还林中广泛种植刺槐、柠条、苜蓿、杨树、侧柏的土壤中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的分布特征。结果表明:0~160 cm 土层中上述不同植被土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的平均含量由高到低依次为柠条>刺槐>苜蓿>侧柏、杨树>荒坡地($P<0.05$);人工林地土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量大于荒坡地,豆科植被大于其他植被;从整个土壤剖面看,这几种植被在0~20 cm 表层土壤中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量均高于其底下各土层,以苜蓿最高,达到 $6.12\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,柠条次之,为 $5.82\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;随着土层深度的增加,在20~60 cm 柠条、苜蓿和刺槐土壤中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量随深度增加逐渐下降,并于60 cm 以后趋于稳定,杨树、侧柏与荒坡地 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量随土层的加深变化不大;各植被在140 cm 以下土层中均存在 $\text{NO}_3\text{-N}$ 富集现象;不同坡位的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 均呈现坡顶>坡中>坡底的趋势,阴坡土壤的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量显著高于阳坡($P<0.05$)。

关键词:黄土坡地;退耕植被;硝态氮;分布;迁移

中图分类号:S154.4 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2012)01-0155-06

Soil Nitrate Nitrogen Distribution and Transportation Under Several Vegetations on the Reconstructed Sloping Land in the Loess Plateau

ZHANG Yu¹, ZHANG Hai^{1*}, QI Yan-bing¹, HAO Yue-jiao¹, BAI Yan-fang²

(College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in North-west China, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, China; Construction Project Exchange Center of the Fourth Agricultural Division, Production & Construction Corps in Xinjiang, Yining 835000, China)

Abstract: Leaching of nitrate nitrogen is an important contributor to the non-point pollution and eutrophication, and it is harmful to human by food chain. Most of the researchers give more concerns on nitrate nitrogen leaching by fertilization, few research have reported on the distribution and transportation of nitrate nitrogen in sloping land. In this study, soil nitrate nitrogen distribution was conducted under 5 vegetations on reconstructed sloping land in the Loess Plateau. The result indicated that vegetation reconstruction improved soil nitrate nitrogen, its content shown as *Caragana Korshinskii*>*Robinia pseudoacacia*>*Medicago sativa*>*Platycladus* and *Populus tremula*>wasteland($P<0.05$) in whole profile. Soil nitrogen content of legume vegetations was higher than non-legume. The top layer(0~20 cm) had the highest nitrate nitrogen, especially for *Medicago sativa* and *Caragana Korshinskii*, the content were $6.12\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $5.82\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ respectively. With the increase of depth, soil nitrate content of *Caragana Korshinskii*, *Medicago sativa* and *Robinia pseudoacacia* decreased gradually, and tended to be stable under 60 cm, while little changes was found for *Populus tremula*, *Platycladus orientalis* and slope wasteland in the same layer. The distinctive founding was nitrate nitrogen enriched in all selected vegetations under 140 cm. Additionally, the nitrate nitrogen content was highest in the top slope, followed by middle slope and down slope, and it was significantly higher in the sunny slope than shade slope. Therefore, legume vegetations had the higher contribution on nitrate nitrogen accumulation, transportation of nitrate nitrogen was affected by position and direction of the slope, and vegetation reconstruction could reduce transportation speed effectively in the Loess Plateau.

Keywords: loess sloping land; de-farming vegetation; nitrate; distribution; transport

收稿日期:2011-07-11

基金项目:陕西省科技攻关项目“黄土高原坡地经济林栽培技术研究”(编号:2010K01-12);“黄土高原坡地经济林抗旱抚育及林草和谐共生技术研究”(编号:2008K02-07)资助

作者简介:张宇(1984—),男,硕士,研究方向为植被恢复及生态修复。E-mail:zhangyu16315@163.com

*通讯作者:张海 E-mail:ylzh6@163.com

NO₃-N 的淋失是土壤氮素损失的主要途径^[1-2], 由于其迁移活跃且易引起面源污染^[3], 并与湖泊富营养化以及大气变暖有着直接的关系^[4-5], 同时人体吸收过量的 NO₃-N 可生成强致癌的 N-亚硝基胺和次生胺, 对健康产生严重的损害^[6], 近年来已引起广泛的关注。很多研究指出, 农田施肥是硝酸盐面源污染的主要途径, 加之土壤 NO₃-N 又是土壤肥力的重要指标之一, 故目前大多数研究均集中在农田施肥及管理方面^[7-9], 对退耕坡地土壤中 NO₃-N 的分布及迁移行为报道较少。为了探讨黄土高原坡地植被恢复与土壤 NO₃-N 的分布以及迁移行为与植被恢复之间的关系, 本实验研究了该区坡地在不同植被覆盖条件下土壤中 NO₃-N 的分布特征, 以及不同坡位、坡向的分布差异及富集行为, 以期为该区坡地的合理管理及退耕还林工作提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省米脂县桥河岔乡泉家沟村, 属无定河水系的二级支沟, 流域面积 5.19 km², 主沟道长 4.13 km, 海拔 937~1 148 m。全境属温带半干旱季风气候区, 年均气温 8.4 ℃, 无霜期 162 d, 年降雨量 350~425 mm, 7、8、9 3 个月降水占 60%~70%。土壤为

黄绵土, 剖面发育不明显, 通透性良好, 100 cm 土层土壤有机质含量 3.0 g·kg⁻¹、全氮 0.32 g·kg⁻¹、全磷 0.52 mg·kg⁻¹、全钾 20.3 mg·kg⁻¹, pH 8.35。

1.2 材料和采样方法

选取坡度为 25°左右的退耕农田地, 面积约 13.5 hm², 前茬种植谷子, 地力均匀, 于 1999 年分别种植刺槐 (*Robinia pseudoacacia* L.)、苜蓿 (*Medicago sativa* L.)、柠条 (*Caragana Korshinskii* Kom)、侧柏 (*Platycladus orientalis* L.) 和杨树 (*Populus tremula*) 等退耕还林主栽树种, 以荒坡地作为对照。于 2010 年采样, 每种植被设 4 个重复, 并分别在坡顶、坡中、坡底 3 个坡位建立采样点, 为了研究同种植被不同坡向土壤中 NO₃-N 含量的变化规律, 又选取同坡度的阴坡、阳坡刺槐林建立采样点, 每个采样点以 1 个取土点为中心, 在 2 m 半径内再取 5 个点混合而成, 同时用 GPS 定位仪记录中心点位置, 用土钻分别钻取 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm、100~120 cm、120~140 cm、140~160 cm 土层的土样, 放入保鲜袋中带回实验室, 供测定使用。在试验期内无人为施肥, 研究地基本情况如表 1 和图 1。

1.3 样品分析及数据处理

土壤 NO₃-N 的含量采用全自动流动分析仪测定^[10]。所有数据采用 Microsoft Excel 2003 作图和 SPSS 软件

表 1 研究地基本情况
Table 1 Characteristics of the sample site

植被类型 Vegetation type	纬度 Longitude/(N)	经度 Latitude/(E)	高度 Altitude/m	坡向 Slop direction	坡度 Gradient
柠条 <i>C.korshinskii</i>	37°46.06'	110°16.12'	1 000	E44°N	24°
	37°46.05'	110°16.15'	1 031	N30°E	25°
	37°46.03'	110°16.17'	1 068	N17°E	24°
杨树 <i>Populus</i>	37°46.08'	110°16.14'	987	W44°S	26°
	37°46.02'	110°15.92'	985	W34°S	26°
苜蓿 <i>M. sativa</i>	37°46.05'	110°15.88'	1 007	S24°E	26°
	37°46.03'	110°15.88'	990	S44°E	26°
侧柏 <i>P. orientalis</i>	37°46.02'	110°16.01'	999	E36°S	24°
	37°46.04'	110°16.01'	1 027	E35°S	25°
	37°46.06'	110°16.00'	1 071	E25°S	24°
刺槐 <i>R. pseudoacacia</i>	37°46.10'	110°15.78'	1 000	N23°W	25°
	37°46.09'	110°15.80'	1 030	N	25°
	37°46.08'	110°15.83'	1 075	N10°E	25°
	37°46.13'	110°15.91'	990	E37°S	25°
	37°46.10'	110°15.88'	1 030	E35°S	26°
	37°46.08'	110°15.85'	1 061	E37°S	26°
荒地 Wasteland	37°46.00'	110°15.94'	997	N20°W	24°
	37°46.02'	110°15.92'	1 028	N14°W	24°
	37°46.04'	110°15.84'	1 075	N31°W	24°

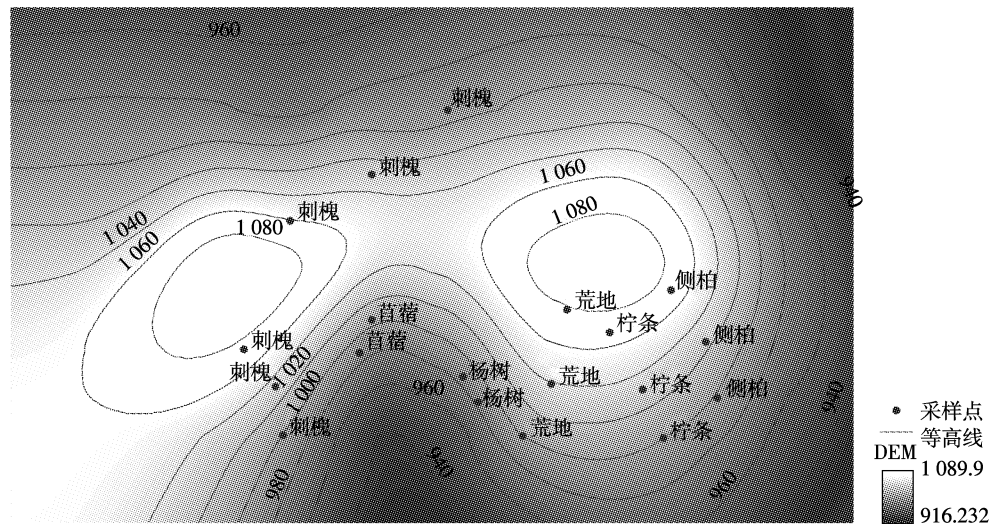


图 1 采样点分布示意图

Figure 1 Research area with sampling sites in Quanjiagou

进行统计分析。

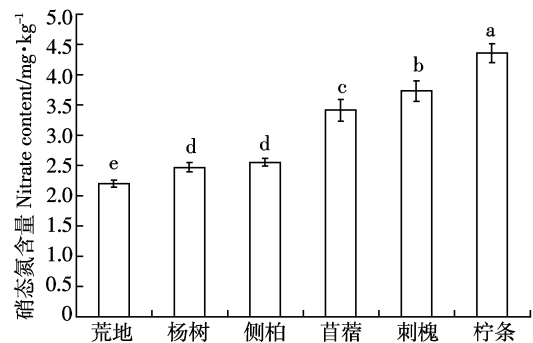
2 结果与分析

2.1 不同植被对土壤 NO_3^- -N 含量的影响

由图 2 可以看出,各植被土壤 NO_3^- -N 含量均明显高于荒地,其 0~160 cm 土层中平均含量由高到低依次为:柠条>刺槐>苜蓿>侧柏、杨树>荒地($P<0.05$)。说明人工林可有效地提高坡地土壤 NO_3^- -N 的含量,且不同植被对土壤 NO_3^- -N 的贡献率有明显差异。豆科植被表现尤为突出,其土壤 NO_3^- -N 的含量明显高于其他植被与对照,其中柠条、刺槐林地土壤的 NO_3^- -N 含量分别为 $4.36 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $3.73 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,分别是对照的 1.89 倍和 1.69 倍,是杨树的 1.76 倍和 1.50 倍,说明豆科植被更有利于土壤 NO_3^- -N 的积累。

2.2 不同植被覆盖下土壤剖面 NO_3^- -N 含量的变化

从图 3 可以看出,几种植被在 0~20 cm 表层土



不同字母表示硝态氮含量差异显著 ($P<0.05$)

Different letters on the bars means significant difference at $P<0.05$

图 2 不同植被土壤硝态氮含量变化

Figure 2 Average nitrate content in soil profile under different vegetations

壤中 NO_3^- -N 的含量均高于以下各土层,其中豆科植被最为明显,苜蓿达到 $6.12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,柠条为 $5.82 \text{ mg} \cdot$

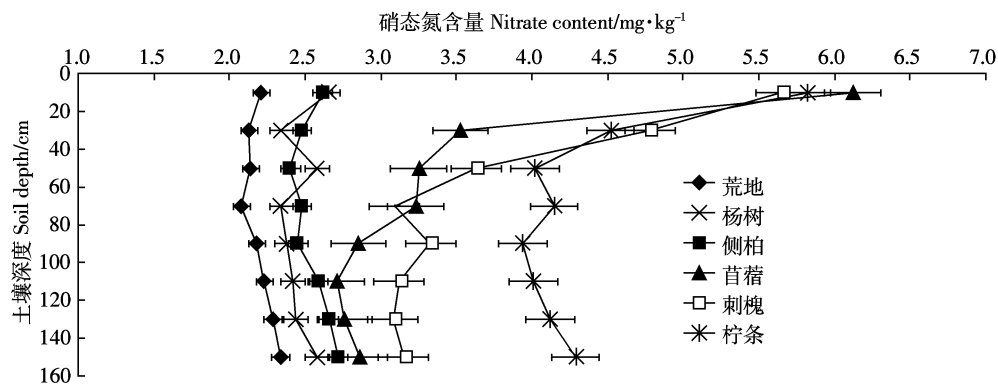


图 3 不同植被覆盖下土壤剖面硝态氮含量变化趋势

Figure 3 Distribution of nitrate in whole soil profile (0~160 cm) under different vegetations

kg^{-1} ,侧柏最低为 $2.62 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,分别是其 20 cm 以下土层的 2.02 倍和 1.40 倍;在 20~60 cm 土层中柠条、苜蓿和刺槐土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的含量逐渐降低,分别从 4.52 、 $3.53 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $4.78 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,下降到 4.02 、 $3.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $3.63 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,并于 60 cm 以后趋于稳定。说明在自然条件下豆科植被 0~20 cm 土层 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的含量高,其随径流发生坡向性迁移或流失的可能性很大;在 140 cm 以下的土层中各植被 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的含量较上层有所回升,出现一定的富集现象。

2.3 坡位对植被土壤中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 分布的影响

为了研究不同植被坡面土壤中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的迁移及富集行为,选取柠条、刺槐和侧柏,并以荒坡地为对照,分别在坡顶、坡中、坡底 3 个坡位建立采样点,采集 0~160 cm 不同土层的土样,结果见图 4。

图 4 显示参试植被土壤中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的含量在不同坡位存在明显差异:柠条在坡顶、坡中和坡底处分别为 4.57 、 $5.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $5.63 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,坡中、坡底分别比坡顶升高了 17.07% 和 23.19%;刺槐在坡顶、坡中和坡底处含量分别为 3.28 、 $3.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $4.12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,坡中和坡底分别比坡顶升高了 5.18% 和 25.61%;侧柏在坡顶、坡中和坡底处分别为 2.16 、 $2.31 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $2.78 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,坡中和坡底分别比坡顶升高了 6.90% 和 28.70%。同样,荒坡地在坡顶、坡中和坡底处分别为 1.85 、 $3.01 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $5.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,坡中和坡底分别比坡顶升高了 62.70% 和 175.68%。由此可见,参试植被土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的迁移量明显低于荒坡地,同时可以看出,以上几种植被土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的含量均表现为坡底>坡中>坡顶,且由于植被的不同,其迁移量有一定的差异,说明黄土高原坡地土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的迁移活跃,其总的趋势为坡顶与坡中流失、坡底

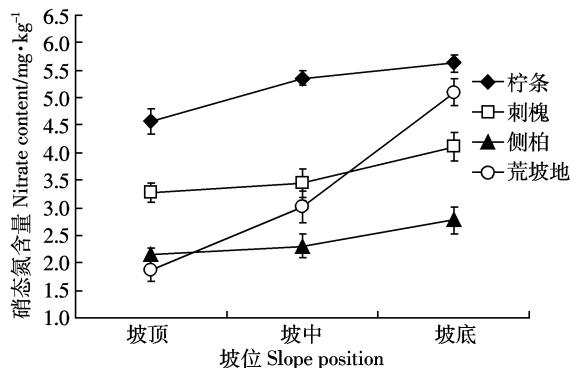


图 4 坡位对柠条、刺槐、侧柏以及荒坡地土壤硝态氮含量的影响

Figure 4 Soil nitrate content under *Caragana korshinskii*, *Robinia pseudoacacia*, *Platycladus orientalis* and wasteland in different slope position

富集。

2.4 坡向对植被土壤中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 分布的影响

坡向可以影响植物接受阳光照射的时间和强度,影响土壤水分的蒸发和枯枝烂叶的分解^[1],进而影响土壤中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的含量。为了研究同一植被不同坡向处 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的分布规律,选择长势较均匀的刺槐林,采集其在阳坡、阴坡两个坡向 0~160 cm 土层的土样进行测定,结果见图 5。

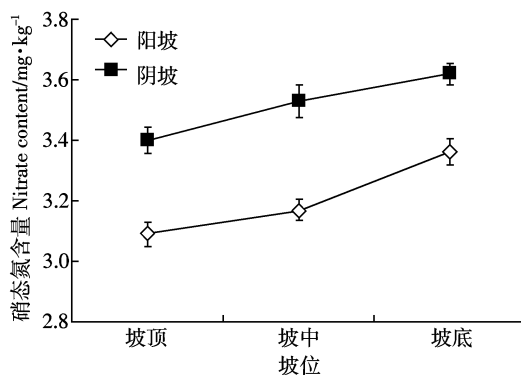


图 5 坡向对刺槐土壤硝态氮含量的影响

Figure 5 Soil nitrate content in *Robinia pseudoacacia* in different slope position

如图 5 所示,坡地刺槐林阴坡土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的含量显著高于阳坡 ($P < 0.05$)。在坡顶,阴坡含量为 $3.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,阳坡为 $3.09 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,阴坡比阳坡高 10.03%;在坡中,阴坡含量为 $3.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,阳坡为 $3.17 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,阴坡比阳坡高 11.37%;在坡底,阴坡含量为 $3.54 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,阳坡为 $3.36 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,阴坡比阳坡高 5.36%。同时还可以看到与图 4 类似的结果,即同一坡向的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的含量也呈现出坡底>坡中>坡顶的趋势,说明该区土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的迁移与坡向无关。

3 讨论

土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 是土壤可利用氮素的重要指标之一,同时土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的淋失又是氮素损失的主要途径,可见土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量的高低对黄土高原地区生态环境的建设具有重要的意义。研究发现,在整个植被恢复与重建过程中,所有参试植被土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的含量较荒坡地均出现不同程度的增加,说明种植人工林可有效地改善坡地营养状况,但是不同植被对土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的贡献不同,其中柠条林对土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量的提高效果最好,侧柏和杨树的效果稍差,基本表现为豆科植被的贡献率大于其他植被,这是由于豆科植被具有较强的固氮能力,使得土壤中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的含量

有所增加。近几年许多学者也有类似的结论^[12-13]。

影响土壤剖面 NO_3^- -N 含量变化的因素很多,包括土壤水分含量、扩散速率、孔隙度、孔隙中溶质运移速率、离子交换能力以及土壤中的化学反应等^[14-16]。而本实验发现不同植被土壤剖面 NO_3^- -N 的含量存在很大差异,且随土层深度的增加变化明显。0~20 cm 表层土壤 NO_3^- -N 的含量较高,这是因为地表枯枝落叶的分解形成了大量的腐殖质,进而转化为 NO_3^- -N 进入表层土壤;20~60 cm 土层 NO_3^- -N 的含量逐渐减少,说明黄土高原坡地表层土壤比较肥沃,如果植被遭到破坏,表层土流失加剧,必将发生 NO_3^- -N 的迁移和流失,形成面源污染,给生态环境造成巨大的压力;而 60 cm 左右土层正是植物根系生长的活跃层,植物生长对该土层营养物质的汲取力度较大,致使各植被 60 cm 以下土层 NO_3^- -N 的含量变化不大;各植被 140 cm 以下土层 NO_3^- -N 的含量均有所增加,这与吴金水等^[17]提出的 NO_3^- -N 在 140~200 cm 土层中富集一致,但在富集强度以及土层上存在一定的差异,这可能与实验地种植的植物种类、土壤质地以及当地降雨量有一定的关系,有待进一步研究。

坡位对土壤 NO_3^- -N 的含量以及分布影响较大,王辉等^[18]在研究坡地水土流失与土壤养分的关系时曾指出,水土流失是坡地土壤质量退化的重要原因,也是造成土壤 NO_3^- -N 迁移的主要因素。研究表明,随着坡位的降低,土壤 NO_3^- -N 的含量明显增加,这是由于降雨侵蚀及坡面径流的作用使得土壤 NO_3^- -N 发生迁移,说明黄土高原坡地土壤 NO_3^- -N 的迁移活跃,其迁移量与水土流失量有直接的关系,总的趋势为坡顶与坡中流失、坡底富集。柠条、刺槐以及侧柏土壤 NO_3^- -N 的迁移量明显低于荒坡地,说明种植人工林可有效改善土壤 NO_3^- -N 的坡面迁移,对减少黄土高原坡地水土流失起着重要的作用。

坡向对土壤 NO_3^- -N 的含量及分布的影响主要是通过光照强度和光照时间来完成的,阳坡接受的光照强度及时间明显高于阴坡,导致阳坡土壤水分含量较低,有机质分解速率较慢,同时影响到土壤硝化作用,进而导致不同坡向土壤中 NO_3^- -N 的差异。刘世梁等^[19]对此也做了类似的研究,结果表明土壤养分含量与坡向有较大的关系,阳坡的土壤肥力较阴坡低。

4 结论

(1)植被恢复可有效地提高土壤 NO_3^- -N 的含量,

不同植被条件下 0~160 cm 深度土壤 NO_3^- -N 的平均含量由高到低依次为柠条>刺槐>苜蓿>侧柏、杨树>荒坡地($P<0.05$)。

(2)从整个土层剖面看,参试植被 0~20 cm 表层土壤 NO_3^- -N 的含量均高于以下各层,其中苜蓿最高,侧柏最低,豆科植被尤为明显。在 20~60 cm 土层中柠条、苜蓿和刺槐 NO_3^- -N 的含量随深度的增加逐渐下降,并于 60 cm 以后趋于平缓,但仍高于对照;而杨树、侧柏与荒坡地则随土层的加深变化不大。在 140 cm 以下各植被土壤 NO_3^- -N 的含量均有所增加,出现一定的富集现象。

(3)同种植被覆盖下,不同坡位土壤 NO_3^- -N 的分布呈现出坡顶与坡中流失、坡底富集的趋势。阴坡土壤 NO_3^- -N 的含量始终高于阳坡。

本研究证实了在黄土高原地区豆科植被对土壤氮素贡献率大,更有利于土壤 NO_3^- -N 的积累;坡地土壤 NO_3^- -N 的迁移活跃,受坡位、坡向的影响较大,种植人工林可有效减少其坡向性迁移量。

参考文献:

- [1] 张乃明, 李刚, 苏友波, 等. 滇池流域大棚土壤硝酸盐累积特征及其对环境的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(6): 215-217.
ZHANG Nai-ming, LI Gang, SU You-po, et al. Characteristics of nitrate accumulation in the greenhouse soil of Dianchi basin and its effect on the environment[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(6): 215-217.
- [2] 周博, 周建斌, 韩东锋, 等. 日光温室土壤剖面硝态氮在休闲期的运移研究[J]. 西北农业学报, 2008, 17(2): 118-121.
ZHOU Bo, ZHOU Jian-bin, HAN Dong-feng, et al. Study of nitrate migration in leisure period of greenhouse[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2008, 17(2): 118-121.
- [3] 王红霞, 周建斌, 雷张玲, 等. 有机肥中不同形态氮及可溶性有机碳在土壤中淋溶特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1364-1370.
WANG Hong-xia, ZHOU Jian-bin, LEI Zhang-ling, et al. Leaching of different forms of nitrogen and dissolved organic carbon of organic manure in soil column[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4): 1364-1370.
- [4] 王晓燕. 非点源污染管理[M]. 北京: 海洋出版社, 1993.
WANG Xiao-yan. Non-point pollution management[M]. Beijing: Ocean Press, 1993.
- [5] Boers P C M. Nutrient emissions from agriculture in the Netherlands: Causes and remedies[J]. *Water Science and Technology*, 1996, 13(3): 133-183.
- [6] 高鹏程, 张国云. 米脂县城饮用水硝态氮监测[J]. 西北农业学报, 2002, 11(1): 103-105.
GAO Peng-cheng, ZHANG Guo-yun. Monitoring to nitrate of potable

- water in Mizhi County[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2002, 11(1): 103-105.
- [7] 王兴武, 于 强, 张国梁, 等. 鲁西北平原夏玉米产量与土壤硝态氮淋失[J]. 地理研究, 2005, 24(1): 140-150.
- WANG Xing-wu, YU Qiang, ZHANG Guo-liang, et al. The yield and dynamics of soil nitrate for summer maize on the plain of Northwest Shandong Province[J]. *Geographical Research*, 2005, 24(1): 140-150.
- [8] 高效江, 胡雪峰, 王少平, 等. 淹水稻田中氮素损失及其对水环境影响试验研究[J]. 农业环境保护, 2001, 20(4): 196-198.
- GAO Xiao-jiang, HU Xue-feng, WANG Shao-ping, et al. Loss of nitrogen in rice field and its influence on water environment[J]. *Agro-environmental Protection*, 2001, 20(4): 196-198.
- [9] 王少平, 俞立中, 许世远. 上海青紫泥土壤氮素淋溶及其对水环境影响研究[J]. 长江流域资源与环境, 2002, 11(6): 554-557.
- WANG Shao-ping, YU Li-zhong, XU Shi-yuan. Nitrogen leaching in the Purple Clay and analysis on its Influence on water environmental quality in Shanghai[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2002, 11(6): 554-557.
- [10] Karel D, Pascal B, et al. Seasonal groundwater nitrate dynamics in a riparian buffer zone[J]. *Agronomie*, 2002, 22: 747-753.
- [11] Gong X, Brueck H, Giese K M, et al. Slope aspect has effects on productivity and species composition of hilly grassland in the Xilin River Basin, Inner Mongolia, China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2008, 72(4): 483-493.
- [12] 张晓红, 徐炳成, 李凤民. 黄土塬区三种豆科牧草的土壤养分剖面分布特征与平衡[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(4): 810-817.
- ZHANG Xiao-hong, XU Bing-cheng, LI Feng-min. Nutrient equilibrium and distribution along soil profile of three legumes on highland Loess Plateau[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(4): 810-817.
- [13] 成 毅, 安韶山, 李国辉, 等. 宁夏黄土丘陵区植被恢复对土壤养分和微生物生物量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(2): 261-266.
- CHENG Yi, AN Shao-shan, LI Guo-hui, et al. Soil nutrient and microbial biomass in the Loess hilly area of Ningxia under different plant rehabilitation patterns [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(2): 261-266.
- [14] Sergio M Abit, Aziz Amoozegar, Michael J Vepraskas, et al. Fate of nitrate in the capillary fringe and shallow groundwater in a drained sandy soil[J]. *Geoderma*, 2008, 146: 209-215.
- [15] Moreno F, Cayula J J A, Fernández E, et al. Water balance and nitrate leaching in an irrigated maize crop in SW Spain[J]. *Agricultural Water Management*, 1996, 32(1): 71-83.
- [16] 张国梁, 章 申. 农田氮素淋失研究进展 [J]. 土壤学报, 1998, 30(6): 291-297.
- ZHANG Guo-liang, ZHANG Shen. Progress of nitrogen leaching in farmland[J]. *Soils*, 1998, 30(6): 291-297.
- [17] 吴金水, 郭胜利, 党廷辉. 半干旱区农田土壤无机氮积累与迁移机理[J]. 生态学报, 2003, 23(10): 2041-2049.
- WU Jin-shui, GUO Sheng-li, DANG Ting-hui. Mechanisms in the accumulation and movement of mineral N in soil profiles of farming land in a semi-arid region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(10): 2041-2049.
- [18] 王 辉, 王全九, 邵明安. 前期土壤含水量对黄土坡面氮磷流失的影响及最优含水量的确定[J]. 环境科学学报, 2008, 28(8): 1571-1578.
- WANG Hui, WANG Quan-jiu, SHAO Ming-an. Effect of antecedent soil moisture on nitrate-N and phosphorus loss from loess slope-land and determination of optimal moisture values[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(8): 1571-1578.
- [19] 刘世梁, 郭旭东, 连 纲, 等. 黄土高原土壤养分空间变异的多尺度分析[J]. 水土保持学报, 2005, 19(5): 105-108.
- LIU Shi-liang, GUO Xu-dong, LIAN Gang, et al. Multi-Scale analysis of spatial variation of soil characteristics in loess plateau: Case study of Hengshan County[J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2005, 19(5): 105-108.