

# 敦煌地区土壤剖面硝酸盐的迁移累积规律\*

赵梦竹, 马金珠, 孙朋, 赵玮, 张琨

(兰州大学资源环境学院, 兰州 730000)

**提 要:** 包气带是连接大气层和含水层的关键地带, 研究土壤中硝酸盐的迁移累积规律对防止地下水硝酸盐污染至关重要。选取我国西北干旱区敦煌盆地典型土壤为研究对象, 测定各土壤剖面中的  $\text{Cl}^-$  和  $\text{NO}_3^-$  浓度, 探究硝酸盐的迁移规律和影响因素。结果表明:  $\text{Cl}^-$  和  $\text{NO}_3^-$  主要集中在 0~40cm 近地表层土壤中, 其硝酸盐的累积量占总累积量的 80% 以上,  $\text{NO}_3^-$  在 1m 的土壤剖面中呈 S 型迁移规律, 适宜的含水率、疏松的土质和较高的植被覆盖度均有利于  $\text{NO}_3^-$  的垂向迁移;  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{Cl}^-$  在沙漠中呈活塞式迁移规律, 二者显著正相关并与含水率负相关, 短暂的降雨和强烈的蒸发使硝酸盐在地表大量富集, 深层土壤的含量高表明了硝酸盐的淋吸效应, 较高的  $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$  说明硝酸盐在干旱时富集度高。

**关键词:** 敦煌; 土壤; 硝酸盐; 迁移

中图分类号: P641.3

文献标识码: A

水是人们赖以生存的宝贵资源, 然而, 我国水资源短缺以及日益严峻的水安全问题已经引起了社会的广泛关注<sup>[1-2]</sup>。目前各研究表明地下水硝酸盐污染已经十分严重<sup>[3-5]</sup>, 具有隐蔽性和难治理性<sup>[6]</sup>。地下水硝酸盐污染可能引起高铁血红蛋白症等疾病, 甚至诱发癌症<sup>[7]</sup>, 危害人体健康。我国西北干旱区是典型的水量型缺水地区, 地下水一旦被污染, 不仅加重水源危机, 而且制约区域经济发展。由于耕作层以下土壤中硝酸盐不能被植物吸收利用, 蓄积层的淋溶是引起地下水污染的主要原因之一<sup>[8,9]</sup>。包气带土层是阻控并拦截多余的硝酸盐的主要屏障, 可以有效地减缓并抑制硝酸盐的迁移<sup>[10,11]</sup>, 而研究区质地较轻的沙质土壤中的硝酸盐更容易随水分移动而流失<sup>[12-14]</sup>。因此硝酸盐向深层土壤淋溶而造成地下水硝酸盐污染的风险可能更大, 潜在威胁更严重。近几十年来, 敦煌市对水资源的不合理利用导致地下水埋深急剧下降<sup>[15]</sup>, 土壤包气带厚度增大, 显著改变了水分入渗路径和入渗系数<sup>[16]</sup>, 从而改变了硝酸盐向地下水移动的通道。环境因子的改变使得土壤中硝酸盐的迁移累积规律有了新变化。因此, 探究敦煌地区土壤中硝酸盐的迁移累积规律进一步阐明干旱区地下水硝酸盐污染过程, 揭示旱地气候地质特征对土壤硝酸盐迁移累积规律的影响, 有利于为控制地下水硝酸盐污染提供理论依据, 对保护水资源, 调整农业结构, 促进经济发展具有重要的现实意义。

## 1 材料与研究方法

### 1.1 研究区概况

敦煌市位于东经  $92^{\circ}13' \sim 95^{\circ}30'$ 、北纬  $39^{\circ}53' \sim 41^{\circ}35'$  之间, 处甘肃省西北部, 东邻瓜州县, 南与肃北蒙古自治县和阿克塞哈萨克自治县毗邻, 西与新疆若羌县接壤, 北与新疆哈密市相连, 总面积  $3.12 \text{万 km}^2$ , 平均海拔 1138m, 年平均降水量 39.9mm, 年平均蒸发量 2486mm, 全年日照时数为 3246.7h, 年太阳辐射量为  $6882.57 \text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ , 年平均气温为  $9.4^{\circ}\text{C}$ , 年平均无霜期 142d。属于典型的暖温带干旱性气候, 具有干燥少雨, 风沙频繁, 昼夜温差大, 日照时间长的特点。地貌主要为戈壁、沙漠, 土壤类型主要为灰棕漠土、

\* 收稿日期: 2015-5-21。

基金项目: 国家自然科学基金(41271039)资助。

作者简介: 赵梦竹(1990-), 女, 汉族, 安徽宿州人, 硕士研究生, 主要研究干旱区水文水资源与环境保护。

E-mail: zhaomzh13@lzu.edu.cn

通讯作者: 马金珠(1968-), 男, 汉族, 甘肃静宁人, 教授, 博士研究生导师, 主要研究干旱区水文与环境。E-mail: jzma@lzu.edu.cn

风沙土 植被覆盖度很低,以梭梭、胡杨、芦苇为主。

### 1.2 采样及分析方法

于晴朗无风天气,在敦煌绿洲周边的高覆天然植被区(DH04)、低覆天然植被区(DH06)、无植被覆盖沙漠裸土区(DH12)用铁锹垂直挖取1m深的土壤剖面,每20cm土壤作为一个土层样品,垂直切入环刀取样并称重,另取相同样品密封于样品袋中保存待测。用人工手摇钻在沙漠边缘(DH10)和沙漠腹地(DH11)分别垂直于地面钻取6m深的土壤剖面,每25cm土壤作为一个土层样品,钻头取样待测。现场测定土壤温度及体积含水率, GPS定位并记录周围环境。采用常规分析法测定土样的pH、TDS以及SEC。采用德国耶拿HT-1300总有机碳分析仪测定土样的有机质含量。采用烘干法测定土样的质量含水率。采用离心萃取法测定土样的 $Cl^-$ 和 $NO_3^-$ 浓度,土壤样品和去离子水按1:1浸提后用离子色谱仪(ICS-2500)测定 $Cl^-$ 和 $NO_3^-$ 的含量。

### 1.3 数据处理

土壤剖面硝酸盐的总累积量为每一土层的硝酸盐累积量之和<sup>[17]</sup>,每层的累积量由下式计算:

$$R_i = c \times d \times h / 10$$

式中: $R_i$ 为每一土层的硝酸盐累积量( $kg \cdot hm^{-2}$ );  $c$ 为该土层土壤中硝酸盐含量( $mg \cdot kg^{-1}$ );  $d$ 为该土层土壤容重( $g \cdot cm^{-3}$ );  $h$ 为土层厚度cm。

## 2 结果与分析

### 2.1 $Cl^-$ 和 $NO_3^-$ 在土壤剖面中的迁移规律

$Cl^-$ 是自然界中最稳定的元素之一<sup>[18]</sup>,可作为稳定示踪剂来有效地反映离子的迁移规律, $NO_3^-$ 与 $Cl^-$ 的比值则可在一定程度上反映 $NO_3^-$ 的富集程度。三种不同岩性剖面 $Cl^-$ 含量、 $NO_3^-$ 含量及 $NO_3^-/Cl^-$ 随包气带埋深的变化(图1、图2、图3)。

由图1可知,浅层包气带 $Cl^-$ 浓度差异较大,范围为 $14200mg \cdot kg^{-1} \sim 9mg \cdot kg^{-1}$ ,DH04、DH06、DH12三个剖面中 $Cl^-$ 浓度平均值相差很大且呈递减趋势,分别为 $6998mg \cdot kg^{-1}$ , $573mg \cdot kg^{-1}$ 和 $23mg \cdot kg^{-1}$ 。DH04剖面 $Cl^-$ 含量相差极大,由表层的 $13078mg \cdot kg^{-1}$ 最后降为 $28mg \cdot kg^{-1}$ ,是表层浓度的4.7%。DH06剖面中 $Cl^-$ 浓度波动下降,呈明显的S型迁移规律。 $Cl^-$ 在DH12剖面中的迁移规律与DH04剖面相似,但含量处于较低的水平,范围为 $45mg \cdot kg^{-1} \sim 9mg \cdot kg^{-1}$ 这与土壤本身的性质有

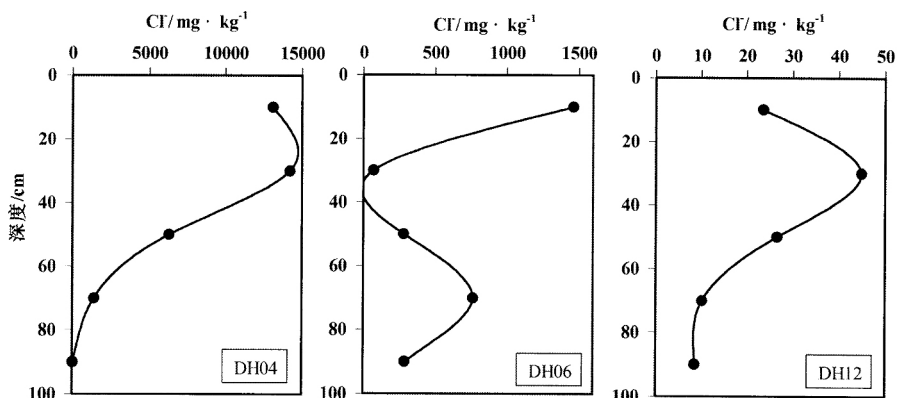


图1 各土壤剖面 $Cl^-$ 的分布

Figure 1 Distribution of  $Cl^-$  in the profiles of soil

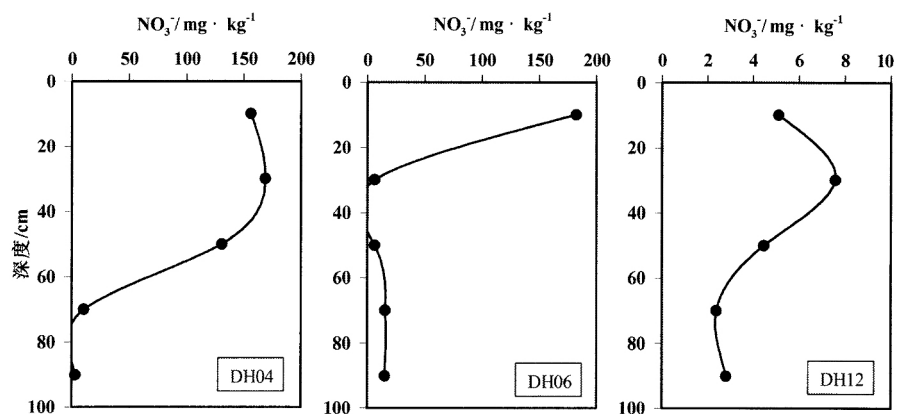


图2 各土壤剖面 $NO_3^-$ 的分布

Figure 2 Distribution of  $NO_3^-$  in the profiles of soil

关,沙质土壤孔隙度大,吸附作用小,较好的导水性及较差的持水性有利于  $\text{Cl}^-$  的垂向迁移。

$\text{NO}_3^-$  在不同土壤剖面中的迁移过程不同,但是有一定的规律可循,并与  $\text{Cl}^-$  的迁移规律保持较好的正相关性,如图 2。 $\text{NO}_3^-$  在三个 1m 剖面中由上至下迁移后,含量都有不同程度的降低,且其显著降低主要在 20 ~ 60cm 土层。DH04 和 DH12 剖面中  $\text{NO}_3^-$  的迁移规律相似,浓度均在 0

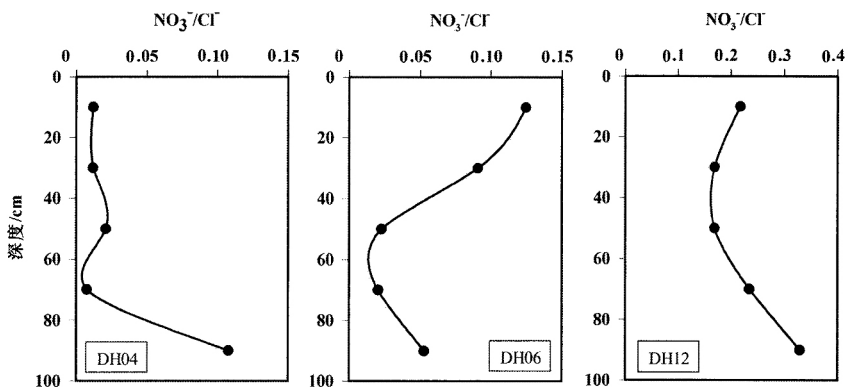


图 3 各土壤剖面  $\text{NO}_3^- / \text{Cl}^-$  的分布

Figure 3 Distribution of  $\text{NO}_3^- / \text{Cl}^-$  in the profiles of soil

~40cm 深度土层中略有升高,达到最大值,在 40 ~ 80cm 深度土层中显著降低,而后基本保持不变。不同的是, DH04 剖面中  $\text{NO}_3^-$  浓度较高,平均值  $94\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,最大值  $169\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,最小值  $3\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,而 DH 剖面中  $\text{NO}_3^-$  浓度较低,平均值  $4.5\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,最大值  $7.6\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,最小值  $2.4\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。 $\text{NO}_3^-$  含量的差异可能是由环境本底值的差异造成的, DH04 剖面中植物残体和动物粪便经微生物的硝化作用可形成大量硝酸盐,而其浓度的降低可能是由于植物根系的吸收。对于 DH12 剖面而言可能与土质有更密切的联系,沙粒含量高的土壤具有低离子交换量,弱结构发育,易漏水漏肥的特点,使得硝酸盐更容易随水分移动而流失<sup>[19]</sup>。DH06 剖面  $\text{NO}_3^-$  在表层的浓度高达  $182\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,在 20 ~ 100cm 土层中含量保持在  $10\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  左右基本不变,与  $\text{Cl}^-$  的含量变化进行对比,进一步证明了植被对硝酸盐的吸收作用明显。

$\text{NO}_3^- / \text{Cl}^-$  的比值能够很好地表征土壤中硝酸盐的富集程度,而  $\text{NO}_3^- / \text{Cl}^-$  的标准差和变异系数能反映富集度的差异性<sup>[20]</sup>,从而定性判断其来源。三个剖面  $\text{NO}_3^- / \text{Cl}^-$  的范围为 0.01 ~ 0.33,均先减小后增大,但 DH04 剖面在 40 ~ 100cm 的土层才表现得较为明显,如图 3,说明有大量植被覆盖的土壤表层和根系层不利于硝酸盐的富集。各剖面的  $\text{NO}_3^- / \text{Cl}^-$  平均值分别为 0.03、0.06、0.22(表 1),说明天然条件下植被覆盖度越高,硝酸盐的富集度越低。DH04 剖面的  $\text{NO}_3^- / \text{Cl}^-$  变异系数最高为 1.33,说明  $\text{NO}_3^-$  的分布不均匀且迁移富集过程受外界影响严重。由于干旱区特殊的自然条件,土壤中的硝酸盐主要来自大气沉降<sup>[21]</sup>, DH12 剖面位于远离市区的荒漠地带,基本不受动植物和人类活动的影响,因此可将该剖面  $\text{NO}_3^- / \text{Cl}^-$  平均值 0.22 作为大气沉降  $\text{NO}_3^- / \text{Cl}^-$  比率,据此初步判定土壤硝酸盐的来源。

表 1 各土壤剖面  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NO}_3^- / \text{Cl}^-$  的特征值

Table 1 Soil characteristics of  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_3^- / \text{Cl}^-$  in the profiles

| 编号   | $\text{Cl}^-$ |         |      | $\text{NO}_3^-$ |       |      | $\text{NO}_3^- / \text{Cl}^-$ |      |      |
|------|---------------|---------|------|-----------------|-------|------|-------------------------------|------|------|
|      | 平均值           | 标准差     | 变异系数 | 平均值             | 标准差   | 变异系数 | 平均值                           | 标准差  | 变异系数 |
| DH04 | 6998.43       | 6505.28 | 0.93 | 93.82           | 80.73 | 0.86 | 0.03                          | 0.04 | 1.33 |
| DH06 | 572.74        | 557.64  | 0.97 | 45.08           | 76.65 | 1.70 | 0.06                          | 0.05 | 0.72 |
| DH12 | 22.70         | 14.69   | 0.65 | 4.47            | 2.07  | 0.46 | 0.22                          | 0.07 | 0.30 |
| DH10 | 7.82          | 6.60    | 0.84 | 3.13            | 2.06  | 0.66 | 0.60                          | 0.38 | 0.63 |
| DH11 | 20.95         | 14.25   | 0.68 | 5.51            | 3.03  | 0.55 | 0.29                          | 0.06 | 0.22 |

## 2.2 $\text{NO}_3^-$ 在土壤中的累积

不同土壤中的硝酸盐累积量不同, DH04、DH06、DH12 三个剖面中硝酸盐的总累积量分别为  $1325\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $623\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  和  $73\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。硝酸盐在不同土层的累积量(图 4)。DH04 剖面中  $\text{NO}_3^-$  累积量的变化范围为  $508\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \sim 10\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,主要集中在 0 ~ 60cm 土壤中,累积量达  $1280\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,占土壤总累积量的 96.6%。在 20 ~ 40cm 土层中累积量最高,可能是由于降雨入渗淋洗所致。DH06 剖面中  $\text{NO}_3^-$  累积量的变化范围为  $511\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \sim 16\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,主要累积在 0 ~ 20cm 的土壤表层,累积量为  $511\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,占土壤总累积量的 82%。DH12 剖面中  $\text{NO}_3^-$  的累积量变化幅度较小,在 20 ~ 40cm 土层中最高为  $25\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,在 60 ~ 80cm 土层最低为  $7\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,平均值为  $15\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,这可能是由于沙漠中硝酸盐本

底值较低,质地疏松的沙土和强烈的蒸发条件使硝酸盐呈明显的活塞式累积规律。

### 2.3 影响 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 垂向迁移累积的因素

水溶态硝酸根在土壤中的垂向迁移受重力及土壤水势差和化学势差控制,硝酸盐存在和水向下移动是两个最重要的原因<sup>[22-23]</sup>。土壤基本理化性质(表2)。

包气带中普遍存在的反硝化过程是改变硝酸盐含量的主要因素,在相同的天然背景下,无施肥土壤中硝酸盐的含量差异主要由于反硝化能力的差异<sup>[24]</sup>。三个剖面土壤 pH 均在 7.3~8.3 之间,呈弱碱性,有利于硝化反应的发生<sup>[25]</sup>,进而有利于 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的产生和积累。土壤较高的 TDS 和 EC 伴随较高的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 固有含量。有机质的存在为硝化反应提供养分,并与植被覆盖度呈正相关<sup>[26]</sup>,三个剖面的植被覆盖度与有机质含量均依次降低,NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量和累积量也依次降低,有机质高的土层硝酸盐累积量高。

各土壤剖面中含水率的分布(图5)。由图可知,DH04剖面土壤的含水率较高,在11%~22%范围内,而较低的植被覆盖度和较疏松的土质使得DH06和DH12剖面土壤的含水率皆不足2.5%,但是依然可以明显地看出NO<sub>3</sub><sup>-</sup>的垂向运移与土壤水分移动相关性极强,这与前人的研究结果一致<sup>[27-28]</sup>。

DH04剖面土壤表层通气性好,适宜的水分含量有利于硝化细菌的生长和繁殖,进而有利于硝酸盐的产生和积累,而深层土壤质地粘重,过多的水分影响空气的流动,易形成厌氧环境,利于反硝化细菌的生长<sup>[29]</sup>,同时,较多的水分溶解更多的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>,植物根系的吸收利用导致NO<sub>3</sub><sup>-</sup>含量急剧降低。裸土中反硝化能力主要受含水量和水分入渗速度的影响,而水分的入渗受土壤结构控制<sup>[30]</sup>。DH12剖面土壤为均匀砂土,排水条件好,水分运移速度快,生物化学作用受到抑制,反硝化程度非常小甚至可以忽略<sup>[31]</sup>,水分含量与NO<sub>3</sub><sup>-</sup>浓度均处于较低的水平并呈现明显的负相关性。

### 2.4 Cl<sup>-</sup>和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>在沙漠中的迁移富集特征

敦煌地区持续的干旱和短暂迅速的降水形成土壤干-湿循环的显著特点,而这种循环在沙漠中表现得更为明显,循环间隔更快<sup>[32]</sup>。DH10和DH11两个6m深的沙漠钻孔剖面的含水率,Cl<sup>-</sup>浓度,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>浓度和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/Cl<sup>-</sup>均随包气带埋深的变化(图6、图7)。

DH10钻孔土壤含水率不足2%,不断循环的降水和蒸发使水分在0~3m的包气带剧烈波动,深层的小幅变化反映了瞬时强降雨产生的浸润作用。Cl<sup>-</sup>浓度平均值9mg·kg<sup>-1</sup>,表层浓度最高,随后的3m含量很低且变化很小,说明长期的干旱造成了Cl<sup>-</sup>在地表的大量蒸发富集,同时水分含量的限制也抑制了离子的垂向迁移。Cl<sup>-</sup>含量持续增加在475~500cm土层再次达到一个峰值,在525~550cm土层中又达到峰

表2 土壤基本理化性质

Table 2 Physical and chemical properties of soil

| 编号   | 深度 (cm) | pH   | TDS (mg·L <sup>-1</sup> ) | EC (us·cm <sup>-1</sup> ) | TOC (%) | 含水率 (%) | 容重 (g·cm <sup>-3</sup> ) |
|------|---------|------|---------------------------|---------------------------|---------|---------|--------------------------|
| DH04 | 0-20    | 7.38 | 30500                     | 48600                     | 2.67    | 11.46   | 1.004                    |
|      | 20-40   | 7.39 | 29300                     | 46900                     | 1.51    | 21.69   | 1.504                    |
|      | 40-60   | 7.64 | 14750                     | 25200                     | 1.27    | 21.95   | 1.755                    |
|      | 60-80   | 8.00 | 4540                      | 8410                      | 0.50    | 14.86   | 1.695                    |
|      | 80-100  | 7.99 | 3410                      | 6450                      | 0.20    | 15.90   | 1.658                    |
| DH06 | 0-20    | 7.6  | 2830                      | 5380                      | 0.35    | 0.98    | 1.405                    |
|      | 20-40   | 8.33 | 339                       | 696                       | 0.13    | 0.81    | 1.445                    |
|      | 40-60   | 8.11 | 538                       | 1094                      | 0.04    | 0.63    | 1.289                    |
|      | 60-80   | 7.77 | 1430                      | 2800                      | 0.12    | 2.06    | 1.304                    |
|      | 80-100  | 7.82 | 1275                      | 2510                      | 0.06    | 2.31    | 1.217                    |
| DH12 | 0-20    | 7.93 | 137                       | 286                       | 0.01    | 0.79    | 1.725                    |
|      | 20-40   | 7.91 | 240                       | 496                       | 0.02    | 0.55    | 1.673                    |
|      | 40-60   | 7.79 | 310                       | 637                       | 0.01    | 0.88    | 1.572                    |
|      | 60-80   | 8.04 | 183                       | 380                       | 0.01    | 1.61    | 1.528                    |
|      | 80-100  | 8.14 | 185                       | 384                       | 0.02    | 1.78    | 1.544                    |

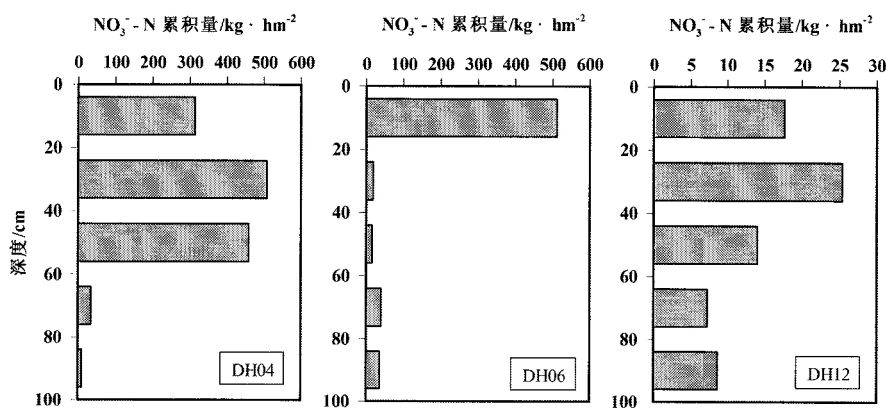


图4 各土壤剖面 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 的累积量

Figure 4 Residual NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N in the profiles of soil

值后有所降低,深层包气带  $\text{Cl}^-$  的变化反映了蒸发量的大小,从而可以记录降水补给和气候变化状况<sup>[33]</sup>。 $\text{NO}_3^-$  浓度平均值  $3\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,是由于沙漠裸土含水率和细菌活跃程度很低,硝化作用和反硝化作用微弱。 $\text{NO}_3^-$  浓度最大值 ( $7\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 和最小值 ( $1\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 皆与  $\text{Cl}^-$  的极值出现在相同位置,迁移规律与  $\text{Cl}^-$  保持高度一致,并与水分的变化呈良好的负相关性。

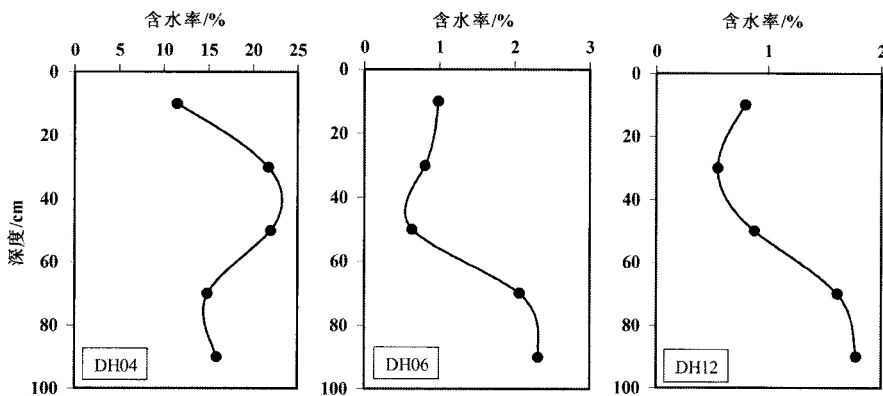


图5 各土壤剖面含水率的分布

Figure 5 Distribution of moisture content in the profiles of soil

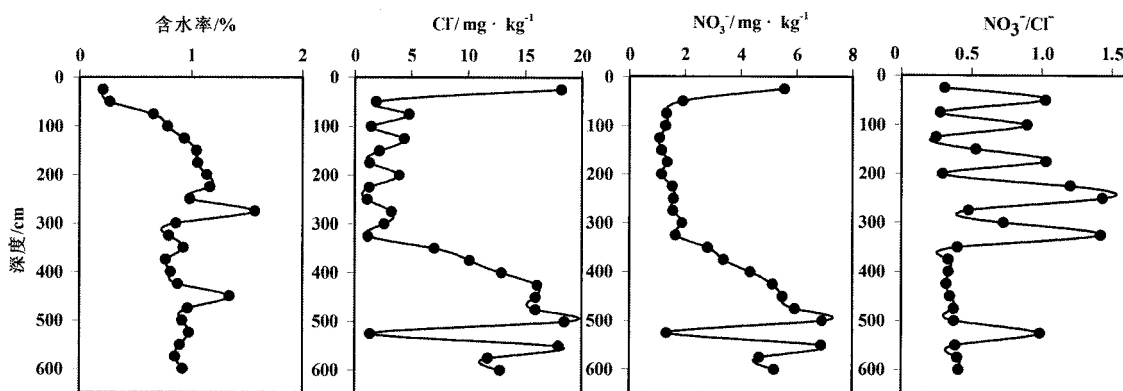


图6 DH10 土壤剖面含水率、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$  和  $\text{NO}_3^- / \text{Cl}^-$  的分布

Figure 6 Distribution of moisture content,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  and  $\text{NO}_3^- / \text{Cl}^-$  in DH10 profiles

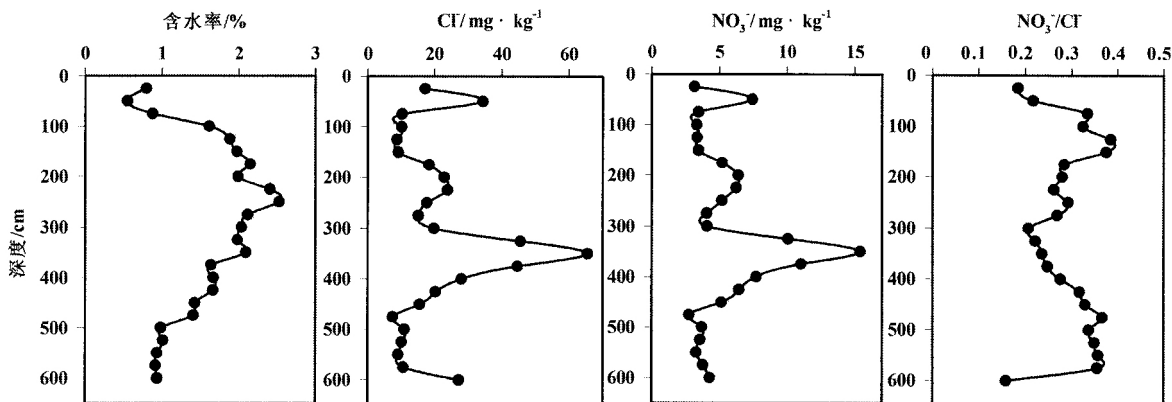


图7 DH11 土壤剖面含水率、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$  和  $\text{NO}_3^- / \text{Cl}^-$  的分布

Figure 7 Distribution of moisture content,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  and  $\text{NO}_3^- / \text{Cl}^-$  in DH11 profiles

$\text{NO}_3^- / \text{Cl}^-$  的平均值为 0.6,在 350cm 以上土层明显波动,范围为 0.3 ~ 1.4,说明硝酸盐的富集作用不稳定,在 500 ~ 525cm 土层达到较高值 1,说明硝酸盐的大量富集累积效应。

DH11 钻孔土壤含水率较 DH10 钻孔略高,且在包气带顶部处于整个钻孔剖面的最低值,随埋深的变化趋势与 DH10 钻孔相似,其中细小的差异可能反映了岩性的差异。 $\text{Cl}^-$  浓度平均值  $21\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,在整个剖面 25 ~ 50cm、325 ~ 350cm、575 ~ 600cm 处分别出现了三个峰值,而在 75 ~ 150 和 475 ~ 575cm 土层浓度很低,基本维持在  $10\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  左右。强降雨促进  $\text{Cl}^-$  的入渗,强蒸发使  $\text{Cl}^-$  向上迁移,共同导致  $\text{Cl}^-$  大量聚集在 320 ~ 470cm 土层。 $\text{NO}_3^-$  含量与 DH10 钻孔差别不大,分别在 25 ~ 50 和 200 ~ 225cm 出现两个峰

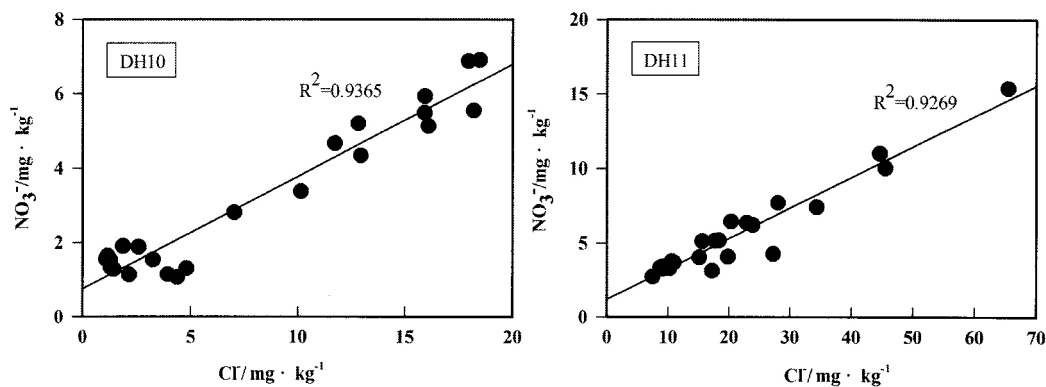


图8 沙漠土壤剖面 Cl<sup>-</sup> 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的关系

Figure 8 Relationship between Cl<sup>-</sup> and NO<sub>3</sub><sup>-</sup> in the profiles of sand

值 浓度为 7mg · kg<sup>-1</sup> 和 6mg · kg<sup>-1</sup> 在 325 ~ 350cm 土层达到最大值 15mg · kg<sup>-1</sup> 这可能是由于后期气候干旱 土壤水分以向上运动为主 导致 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 向上迁移 即土壤氮素的"淋吸效应"<sup>[34]</sup> 随后含量逐渐降低 在 450cm 以下维持较低浓度基本不变。NO<sub>3</sub><sup>-</sup> / Cl<sup>-</sup> 平均值(0.3) 较低 接近大气沉降 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> / Cl<sup>-</sup> 比率 0.22 说明硝酸盐的富集度不高。NO<sub>3</sub><sup>-</sup> / Cl<sup>-</sup> 随包气带埋深增加而呈现的变化规律与水分的变化规律具有高度的负相关性 表明硝酸盐的富集主要发生在干旱阶段。

对 DH10 和 DH11 两个沙漠钻孔中 Cl<sup>-</sup> 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 关系的分析(图8)表明 二者具有很好的正相关关系 相关系数达到极显著水平 分别为 0.94 和 0.93 说明 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 随 Cl<sup>-</sup> 含量的增加而增加 与之前的研究结果相同<sup>[35]</sup>。DH10 钻孔土壤的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> / Cl<sup>-</sup> 平均值远高于大气沉降 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> / Cl<sup>-</sup> (0.22) 反映出有额外陆生系统 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的输入 而相对较高的标准差(0.38) 和变异系数(0.63) 说明 DH10 钻孔土质不均匀且受到一定程度的人为干扰。DH11 钻孔土壤的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> / Cl<sup>-</sup> 平均值略高于大气沉降 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> / Cl<sup>-</sup> 伴随较低的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> / Cl<sup>-</sup> 标准差(0.06) 和变异系数(0.22) 说明偏远沙漠地区受生物扰动作用小 进一步证明了干旱区硝酸盐的主要来源为大气沉降。

### 3 讨论

不同类型土壤具有相似的 Cl<sup>-</sup> 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 在包气带剖面中的分布和迁移规律 浓度自上而下逐渐降低 但存在不同程度的波动 可能是蒸发和下渗共同作用的结果。硝酸盐在三个剖面中的累积深度界限分别为 60cm 20cm 100cm 说明土壤中粘粒含量增加 防污能力增强 土壤砂性越强 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 淋溶损失的可能性越大。硝酸盐的垂向迁移和累积量明显的差异性与 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 本底值、土壤性质、植被覆盖度、人为影响等都有一定的关系 是多种因素综合作用的结果 各个影响因子对硝酸盐迁移累积的具体贡献率还需进一步实验分析。沙漠中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 与 Cl<sup>-</sup> 含量总体很低 具有极高的相关性 这与粗质地的土壤水分和溶质渗漏强有关 这也在一定程度上表明砂土中硝酸盐的淋溶更加强烈 对地下水的潜在威胁更加严重 因此硝酸盐污染的防治在干旱区变得尤为重要。硝酸盐的来源广泛 若 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> / Cl<sup>-</sup> 高于大气沉降 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> / Cl<sup>-</sup> (0.22) 则土壤中硝酸盐的来源除了大气沉降还有陆生系统的介入 然而具体来源的定量分析还需结合硝酸盐同位素进一步探讨。

### 4 结论

敦煌地区包气带 Cl<sup>-</sup> 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 主要集中在 0 ~ 40cm 的近地表层土壤中 硝酸盐在 0 ~ 40cm 土层中的累积量占土壤总累积量的 80% 以上 总累积量在质地粘重 有机质高的土壤中较高 可能受硝化作用和反硝化作用的影响明显。Cl<sup>-</sup> 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 均呈 S 型迁移规律 这与其在剖面中的淋溶和热驱动有关。二者的迁移规律保持高度一致 并与含水率呈良好的负相关性 这在沙质土壤中表现的尤为明显。影响 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 垂向迁移的因素主要是水分含量、土壤性质和植被覆盖度 适宜的含水率和孔隙度大的土壤更有利于 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的迁移 而较高的植被覆盖度大大增加了土壤硝酸盐的固有含量 另外 人为源的影响也不容忽视。对于沙漠

而言,  $\text{NO}_3^-$  与  $\text{Cl}^-$  显著相关, 均呈现明显的活塞式迁移规律, 近地表层  $\text{Cl}^-$  和  $\text{NO}_3^-$  浓度峰值反映了敦煌干旱区迅速的降雨入渗和强烈的蒸发作用, 在深层包气带出现的含量最大值是由土壤离子的“淋吸效应”所致。在植被覆盖率极低的沙漠裸土中水分是  $\text{NO}_3^-$  迁移最主要的限制因素,  $\text{NO}_3^-$  浓度与含水率呈明显负相关, 较低的含水率伴随较高的  $\text{NO}_3^- / \text{Cl}^-$  表明硝酸盐在干旱时富集度高。

### 参考文献

- [1] 洪国华, 梁会圃, 王宏珍. 包气带水研究方向浅议[J]. 地下水, 2006, 27(5): 365-366.
- [2] 李锋瑞. 西北干旱区流域水资源管理研究[J]. 冰川冻土, 2008, 30(1): 12-19.
- [3] 刘宏斌, 雷宝坤, 张云贵, 等. 北京市顺义区地下水硝态氮污染的现状与评价[J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(4): 385.
- [4] 金赞芳, 王飞儿, 陈英旭. 城市地下水硝酸盐污染及其成因分析[J]. 土壤学报, 2004, 41(2): 252-258.
- [5] 赵同科, 张成军, 杜连凤, 等. 环渤海七省(市)地下水硝酸盐含量调查[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2): 779-783.
- [6] 陆安祥, 赵云龙, 王纪华, 等. 不同土地利用类型下氮, 磷在土壤剖面中的分布特征[J]. 生态学报, 2007, 27(9): 3923-3929.
- [7] 张维理, 田哲旭, 张宁, 等. 我国北方农用氮肥造成地下水硝酸盐污染的调查[J]. 植物营养与肥料学报, 1995, 1(2): 80-87.
- [8] 巨晓棠, 张福锁. 中国北方土壤硝态氮的累积及其对环境的影响[J]. 生态环境, 2003, 12(1): 24-28.
- [9] 张云, 张胜, 张凤娥, 等. 耕层以下包气带中氮素蓄积的原位修复治理[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(6): 1217-1222.
- [10] 张云, 张胜, 刘长礼, 等. 包气带土层对氮素污染地下水的防护能力综述与展望[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(增刊): 339-346.
- [11] 李韵珠, 李保国. 土壤溶质运移[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 119.
- [12] Cahn M D, Bouldin D R, Cravo M S. Nitrate sorption in the profile of an acid soil[J]. Plant and Soil, 1992, 143(2): 179-183.
- [13] Khind C S, Meelu O P. Leaching losses of urea-N applied to permeable soils under lowland rice[J]. Fertilizer Research, 1991, 28(2): 179-184.
- [14] 同延安, 石维, 吕殿青. 陕西三种类型土壤剖面硝酸盐累积, 分布与土壤质地的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(4): 435.
- [15] 张明泉, 赵转军, 曾正中. 敦煌盆地水环境特征与水资源可持续利用[J]. 干旱区资源与环境, 2003, 17(4): 71-77.
- [16] 刘戈力. 地下水与水环境[J]. 水利规划与设计, 2004(1): 27-31.
- [17] Zhaohui W, Zhiqiang Z, Shengxiu L, et al. Nitrate accumulation in vegetables and its residual in vegetable fields[J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2002, 23(3): 79-83.
- [18] 马金珠, 李丁, 李相虎. 巴丹吉林沙漠包气带  $\text{Cl}^-$  示踪与气候记录研究[J]. 中国沙漠, 2005, 24(6): 674-679.
- [19] 杨荣, 苏永中. 农田利用方式和冬灌对沙地农田土壤硝态氮积累的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(3): 615-623.
- [20] 张金, 付素静, 王云权, 等. 荒漠地区包气带氯离子与硝酸盐的空间分布特征[J]. 干旱区地理, 2013, 36(3): 409-415.
- [21] Gates J B, Böhlke J K, Edmunds W M. Ecohydrological factors affecting nitrate concentrations in a phreatic desert aquifer in northwestern China[J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42(10): 3531-3537.
- [22] 罗启仕, 王慧, 张锡辉, 等. 土壤中硝酸盐在非均匀电动力学作用下的迁移与转化[J]. 环境科学, 2004, 25(2): 98-103.
- [23] Shuford J W, Fritton D D, Baker D E. Nitrate-nitrogen and chloride movement through undisturbed field soil[J]. Journal of Environmental Quality, 1977, 6(3): 255-259.
- [24] 袁利娟, 庞忠和. 包气带硝酸盐分布的差异性及其形成机理: 以正定, 栾城为例[C]. 中国科学院地质与地球物理研究所 2012 年度(第12届)学术论文汇编-工程地质与水资源研究室, 2013.
- [25] 孙波, 王兴祥, 张桃林. 红壤养分淋失的影响因子[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(3): 257-262.
- [26] 邓建才, 陈效民, 卢信, 等. 封丘地区主要土壤中硝态氮运移规律研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(1): 128-133.
- [27] Sharma S K, Manchanda H R. Influence of leaching with different amounts of water on desalinization and permeability behavior of chloride and sulphate-dominated saline soils[J]. Agricultural Water Management, 1996, 31(3): 225-235.
- [28] Chesnau R, Allen D M, Graham G. Assessment of the impact of nutrient management practices on nitrate contamination in the Abbotsford-Sumas aquifer[J]. Environmental Science & Technology, 2007, 41(21): 7229-7234.
- [29] 严浩, 孙波, 施建平, 等. 红壤旱地氮素的剖面迁移与影响因子[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(1): 137-142.
- [30] 杨维, 郭毓, 王晓华, 等. 氮素在包气带与饱水层迁移转化的实验研究[J]. 环境科学研究, 2008, 21(3): 69-75.
- [31] Harter T, Onsoy Y, Heeren K, et al. Deep vadose zone hydrology demonstrates fate of nitrate in eastern San Joaquin Valley[J]. California Agriculture, 2005, 59(2): 124-132.
- [32] Whitford W G, Steinberger Y, MacKay W, et al. Rainfall and decomposition in the Chihuahuan Desert[J]. Oecologia, 1986, 68(4): 512-515.
- [33] 马金珠, 陈发虎, 赵华. 1000 年以来巴丹吉林沙漠地下水补给与气候变化的包气带地球化学记录[J]. 科学通报, 2004, 49(1): 22-26.
- [34] 串丽敏, 赵同科, 安志装. 土壤硝态氮淋溶及氮素利用研究进展[J]. 中国农学通报, 2010, 26(11): 200-205.
- [35] 李文庆, 管林生. 大棚土壤硝酸盐状况研究[J]. 土壤学报, 2002, 39(2): 283-287.

## Migration and accumulation of nitrate in soil profiles in Dunhuang

ZHAO Mengzhu , MA Jinzhu , SUN Peng , ZHAO Wei , ZHANG Kun

( College of Earth and Environment Science ,Lanzhou University ,Lanzhou 730000 ,China)

**Abstract:** Vadose zone is the key to connecting with the atmosphere and the aquifer; transfer and accumulation law of nitrate in soil is essential to prevent nitrate pollution in groundwater. We selected typical soils of Dunhuang in northwest China for the study object , measured the concentrations of  $\text{Cl}^-$  and  $\text{NO}_3^-$  in each soil profile , and explored the migration of nitrate and factors. The results showed that:  $\text{Cl}^-$  and  $\text{NO}_3^-$  mainly exist in 0 – 40cm soil near the surface , the cumulative amount of its nitrate is accounting for above 80% of the total cumulative amount in soil ,  $\text{NO}_3^-$  has the S – shaped migration in the soil profile. Suitable moisture , loose soil and high vegetation coverage are conducive to vertical migration of  $\text{NO}_3^-$  .  $\text{NO}_3^-$  and  $\text{Cl}^-$  have the piston migration in the desert , both have significant positive correlation and negative correlation with the water content. Short rains and strong evaporation lot nitrate enriched in the surface. The high contents in deep soil show the suction effect of nitrate leaching. The high  $\text{NO}_3^- / \text{Cl}^-$  descript that nitrate is highly enriched during droughts.

**Key words:** Dunhuang; soil; nitrate; migration