

## 黄土高原不同类型土壤团聚体中氮库分布的研究

刘毅<sup>1,2</sup>, 李世清<sup>1,3</sup>, 李生秀<sup>3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院 / 水利部水土保持研究所 / 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100;

<sup>2</sup>中国科学院研究生院, 北京 100039; <sup>3</sup>西北农林科技大学资源与环境学院, 杨凌 712100)

**摘要:**【目的】研究黄土高原主要土壤不同团聚体中氮库的分布特征。【方法】根据不同植被类型和土壤类型, 分别从黄土高原不同地域分层(0~20、20~40和40~60 cm)采集22个土壤剖面样品。【结果】无论哪种团聚体, 从表层向下, 有机氮、矿质氮、铵态氮、硝态氮含量皆呈递减趋势。不同土壤团聚体, 其有机氮含量明显不同, >5 mm、2~5 mm、1~2 mm、0.25~1 mm 粒级团聚体有机氮含量依次递增趋势, 而0.25~1 mm、<0.25 mm 粒级团聚体的有机氮含量依次呈下降趋势, 以0.25~1 mm 团聚体有机氮含量最大; 不同团聚体中铵态氮、硝态氮和矿质氮含量分布没有明显的规律性。由于不同大小团聚体所占比例不同, 因此无论是土壤有机氮, 还是矿物态氮, 其贮量在土壤团聚体中的分布与含量并不完全一致: >5 mm、2~5 mm、1~2 mm 粒级结构体中贮量依次呈递减趋势, 而1~2 mm、0.25~1 mm、<0.25 mm 依次呈递增趋势, 以1~2 mm 结构体贮量最低。【结论】在黄土高原地区, 土壤中各级团聚体含氮量分布随纬度增加而降低, 土垫旱耕人为土各级团聚体含氮量最高, 干润砂质新成土各级团聚体含氮量最低。植被对团聚体中的氮素分布也存在一定影响, 有机氮和矿质氮大体上均呈自然林地>新垦农田>人工林>农地。

**关键词:** 土壤团聚体; 有机氮; 矿质氮; 氮库

## Distribution of Nitrogen Pools in Different Sizes of Loess Plateau Soil Aggregates

LIU Yi<sup>1,2</sup>, LI Shi-qing<sup>1,3</sup>, LI Sheng-xiu<sup>3</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resource / Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling

712100; <sup>2</sup>Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039; <sup>3</sup>College of Resources and Environment,

Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100)

**Abstract:** 【Objective】The nitrogen content of soil aggregates is an important index for assessing the quality of soil structure. Therefore, we investigated the distribution of soil nitrogen pool for a large range size of soil aggregates in this study. 【Method】In terms of the types of vegetation and soil, 22 soil samples from different profile (0-20 cm, 20-40 cm and 40-60 cm) were collected from different regions on the Loess Plateau. 【Result】The results indicated that the content of organic nitrogen, mineral nitrogen, ammonium nitrogen and nitrate nitrogen had a descending tendency with the depth of soil layer, no matter what size of soil aggregate. The content of organic nitrogen differed with various kinds of soil aggregates, for each soil layer, the organic nitrogen content increased in the order of > 5 mm, 2-5 mm, 1-2 mm, and 0.25-1 mm, and decreased from 0.25-1 mm to < 0.25 mm. There was no obvious distribution pattern for the content of mineral nitrogen, ammonium nitrogen and nitrate nitrogen from the size of soil aggregate perspective. Because of the different proportions of each size of soil aggregates, the nitrogen stockpiling quantity (including organic nitrogen, mineral nitrogen, ammonium nitrogen, and nitrate nitrogen) and content in different sizes of soil

收稿日期: 2006-08-16; 接受日期: 2006-10-24

基金项目: 国家自然科学基金(30571116, 30230230)、西北农林科技大学创新团队资助项目和黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金(10501-104)

作者简介: 刘毅(1978-), 男, 湖南新化人, 博士研究生, 研究方向为土壤-植物氮/碳素方面。Tel: 029-87014037; E-mail: lyle3521@126.com。通讯作者李世清(1963-), 男, 甘肃秦安人, 教授, 研究方向为土壤-植物氮素营养方面的教学和研究工作。Tel: 029-87016171; E-mail: sqli@ms.iswc.ac.cn

aggregates varied. It decreased following the sequence of > 5 mm, 2-5 mm, and 1-2 mm, and it increased in the order of 1-2 mm, 0.25-1 mm and < 0.25 mm. 【Conclusion】 The nitrogen content of each kind of soil aggregate decreased with increased latitude on the Loess Plateau. Also, the nitrogen content largely varied with soil, among which Eum-Orthic Anthrosols was the highest and Ust-Sandiic Entisols was the lowest. Vegetation had a large influence on the content and stockpiling quantity of nitrogen, for both organic nitrogen and mineral nitrogen, they showed natural forest land>fresh assart>artificial forest land>farming land, on the whole.

Key words: Soil aggregates; Organic nitrogen; Mineral nitrogen; Nitrogen pool

## 0 引言

【研究意义】氮是大气圈中含量最丰富, 又是陆地生态系统大多数植物光合作用和初级生产过程中最易受限制的元素之一<sup>[1,2]</sup>, 在陆地生态系统功能中起重要作用<sup>[3]</sup>。【前人研究进展】几十年来, 土壤科学工作者在研究土壤氮素方面做了大量工作<sup>[4,5]</sup>, 基本明确了土壤氮素转化及损失机理<sup>[6]</sup>, 同时, 国内外在土壤氮库及其在土壤不同团聚体中分布研究也取得了显著进展, Christensen 等<sup>[7]</sup>发现, 3 种不同土壤施用秸秆后其不同粒级团聚体中的含氮量发生了变化。徐阳春和沈其荣<sup>[8]</sup>通过田间试验研究了长期定位施用不同有机肥料种类对土壤各粒级复合体组成及其中碳、氮、磷含量与分配的影响, 结果表明长期连续施肥后土壤及不同粒级复合体中碳、氮、磷含量均有所增加, 但不同元素在不同粒级复合体中的增幅因肥料种类而异。孙天聪等<sup>[9]</sup>研究了长期施肥对有机碳、全氮、硝态氮和铵态氮在不同粒级土壤团聚体中分布的影响, 结果表明经过长期施肥有机质、全氮在耕层不同粒级团聚体中的含量差异较大, 并且呈现出较强的规律性, 表现为 1~0.25 mm 粒级团聚体中的含量最高。【本研究的切入点】土壤不同团聚体氮库分布研究是对土壤氮库及供氮特性研究的发展和补充, 由于不同团聚体中有机质的组成及转化速率不同, 因而不同大小团聚体中氮库分布必然不同。因此, 研究土壤不同团聚体氮库分布特征, 对明确不同粒级团聚体在土壤氮素肥力中的作用和地位具有重要科学价值。【拟解决的关键问题】本文以黄土高原从北向南不同地区土壤为对象, 研究黄土高原主要土壤不同形态氮库在不同团聚体中的分布状况。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤

从黄土高原由北向南依次由神木、安塞、富县、洛川、杨凌分别采取林地、草地和农田生态系统 0~20、20~40 和 40~60 cm 土层土样 (表 1), 并记录

海拔高度和经、纬度; 土壤类型根据中国土壤系统分类标准<sup>[10]</sup>确定。土壤样品采集后装入密封袋, 带回实验室风干后筛分为不同大小团聚体, 确定各级团聚体含量; 同时测定土壤有机质含量。不同土层土壤有机质含量见表 2。

### 1.2 测定方法

土壤团聚体采用沙维诺夫法分级 (干筛法)<sup>[11]</sup>, 即将自然风干的土壤除去植物残体及小石块后, 称取 500 g 放置在最大孔径土壤筛 (5 mm) 上面, 套筛下面土壤筛孔径依次为 2、1 和 0.25 mm, 底层放置底盒, 以备收取 <0.25 mm 团聚体。将盛土套筛放在干筛振荡机上振荡 5 min 后, 从上至下依次取样, 称重, 求得团聚体组成, 团聚体分析用上海华东仪器厂生产的电动振筛机。

有机质含量采用重铬酸钾外加热法, 全氮用凯氏法消解后, 用全自动定氮仪测定; 采用 1 mol·L<sup>-1</sup> KCl 浸提后, 连续流动分析仪测定; 有机氮含量=全氮含量- (铵态氮含量+硝态氮含量); 矿质氮含量=铵态氮含量+硝态氮含量; 氮贮量=氮含量×团聚体重量, 本研究中不同团聚体氮贮量已换算成为每千克土壤各粒级团聚体氮贮存量。

试验结果采用 SPSS 软件进行显著性检验和多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同粒级团聚体在土壤中的分布

团聚体大小分布规律是影响土壤肥力的重要因素之一。本研究表明 (图 1), 不同大小团聚体在土壤中所占的比例明显不同, 各土层, >5 mm、2~5 mm、1~2 mm 粒级团聚体含量依次呈下降趋势, 而 1~2 mm、0.25~1 mm、<0.25 mm 团聚体的含量依次呈递增趋势, 各土层分别为 9.35%、8.84%和 7.96%, 平均仅为 8.72%, 以 1~2 mm 粒级团聚体所占比例最小。以>5 mm 和<0.25 mm 相对其它较高, 其所占比例在 26.05%~32.38%之间。同时>5 mm、<0.25 mm 与 1~2 mm 粒团聚体之间含量差异显著。图 1 还表明, 尽

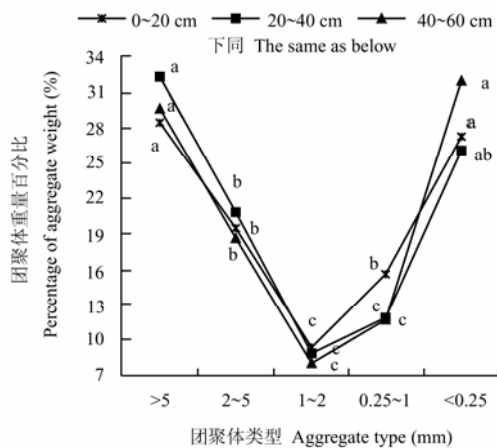
表 1 供试土壤  
Table 1 Soil samples

编号 No.	采样点 Sampling place	经、纬度 Longitude, latitude	海拔 Altitude (m)	地形 Terrain	植被 Vegetation	土壤类型 Soil type
1	神木六道沟	E110°22'1.38"	1198	坡地	黄豆	干润砂质新成土
	Liudaogou Shenmu	N38°47'35.22"		Sloping land	Soybean	Ust-Sandic Entisols
2	神木六道沟	E110°22'2.22"	1202	坡地	弃耕土壤	干润砂质新成土
	Liudaogou Shenmu	N38°47'35.1"		Sloping land	Decultivated soil	Ust-Sandic Entisols
3	神木六道沟	E110°22'6.78"	1291	坡地	苜蓿	干润砂质新成土
	Liudaogou Shenmu	N38°47'34.5"		Sloping land	Alfalfa	Ust-Sandic Entisols
4	神木六道沟	E100°22'3.66"	1216	坡地	弃耕土壤	干润砂质新成土
	Liudaogou Shenmu	N38°47'40.44"		Sloping land	Decultivated soil	Ust-Sandic Entisols
5	神木六道沟	E110°21'57.6"	1189	坡地	苜蓿	干润砂质新成土
	Liudaogou Shenmu	N38°47'41.28"		Sloping land	Alfalfa	Ust-Sandic Entisols
6	神木六道沟	E110°21'56.7"	1188	坡地	黄豆	干润砂质新成土
	Liudaogou Shenmu	N38°47'42.05"		Sloping land	Soybean	Ust-Sandic Entisols
7	安塞墩山	E109°18'51.18"	1289	坡地	谷子	黄土正常新成土
	Dunshan Ansai	N36°51'13.56"		Sloping land	Millet	Los-Orthic Entisols
8	安塞墩山	E109°18'48.24"	1293	坡地	沙打旺	黄土正常新成土
	Dunshan Ansai	N36°51'12.72"		Sloping land	<i>Astragalus adsurgens</i>	Los-Orthic Entisols
9	安塞墩山	E109°19'5.88"	1193	坡地	刺槐	黄土正常新成土
	Dunshan Ansai	N36°51'33.6"		Sloping land	<i>Robinnia pseudoscacia</i>	Los-Orthic Entisols
10	安塞纸坊沟	E109°15'9.72"	1137	坡地	刺槐	黄土正常新成土
	Zhifanggou Ansai	N36°44'52.8"		Sloping land	<i>Robinnia pseudoscacia</i>	Los-Orthic Entisols
11	安塞纸坊沟	E109°15'13.02"	1250	坡地	柠条	黄土正常新成土
	Zhifanggou Ansai	N36°44'33.6"		Sloping land	<i>Caragana korshinskii</i>	Los-Orthic Entisols
12	安塞纸坊沟	E109°15'9.48"	1123	坡地	谷子	黄土正常新成土
	Zhifanggou Ansai	N36°44'25.2"		Sloping land	Millet	Los-Orthic Entisols
13	富县子午岭	E109°08'55.2"	1228	坡地	新垦农田	黄土正常新成土
	Ziwuling Fuxian	N36°05'27.48"		Sloping land	Fresh assart	Los-Orthic Entisols
14	富县子午岭	E109°08'55.2"	1228	坡地	松树	黄土正常新成土
	Ziwuling Fuxian	N36°05'27.48"		Sloping land	Pine	Los-Orthic Entisols
15	富县子午岭	E109°08'55.2"	1228	坡地	新垦农田	黄土正常新成土
	Ziwuling Fuxian	N36°05'27.48"		Sloping land	Fresh assart	Los-Orthic Entisols
16	富县子午岭	E109°08'55.2"	1196	坡地	混交林	黄土正常新成土
	Ziwuling Fuxian	N36°05'27.48"		Sloping land	Mixed forest	Los-Orthic Entisols
17	富县子午岭	E109°26'59.7"	1196	坡地	蒿草	筒育干润均腐土
	Ziwuling Fuxian	N35°59'34.44"		Sloping land	<i>Kobresia capillifolia</i>	Hap-Ustic Isohumisols
18	富县子午岭	E109°26'59.7"	1196	坡地	蒿草	筒育干润均腐土
	Ziwuling Fuxian	N35°59'34.44"		Sloping land	<i>Kobresia capillifolia</i>	Hap-Ustic Isohumisols
19	洛川	E109°24'25.8"	1116	平地	苜蓿	筒育干润均腐土
	Luochuan	N35°43'52.5"		Flat land	Alfalfa	Hap-Ustic Isohumisols
20	洛川	E109°24'25.8"	1115	平地	玉米	筒育干润均腐土
	Luochuan	N35°43'51.88"		Flat land	Maize	Hap-Ustic Isohumisols
21	杨凌	E108°5'10.71"	520	平地	小麦	土垫旱耕人为土
	Yangling	N34°17'4.35"		Flat land	Wheat	Eum-Orthic Anthrosols
22	杨凌	E108°5'10.71"	520	平地	小麦	土垫旱耕人为土
	Yangling	N34°17'4.35"		Flat land	Wheat	Eum-Orthic Anthrosols

表 2 供试土壤各层有机质含量

Table 2 Organic matter content in soil samples ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

编号 No.	土层 Layer (cm)		
	0~20	20~40	40~60
1	4.25	2.84	2.53
2	2.95	1.30	1.73
3	3.94	2.00	1.80
4	3.00	1.99	2.19
5	6.75	3.05	5.06
6	5.19	3.31	3.43
7	10.29	7.92	6.04
8	10.29	3.84	7.48
9	12.54	4.63	5.25
10	14.29	4.96	3.83
11	15.15	7.96	6.07
12	15.89	10.75	8.82
13	14.12	6.87	5.98
14	40.64	14.99	9.52
15	26.53	22.86	11.35
16	30.40	15.57	9.63
17	17.92	-	-
18	18.88	-	-
19	11.97	9.02	7.46
20	13.39	8.74	10.10
21	18.09	13.47	9.32
22	24.57	14.40	11.50



同系列中不同字母表示差异显著( $P<0.05$ )。下同  
Different letters in same series mean significant difference ( $P<0.05$ ). The same as below

图 1 不同土层土壤团聚体重量分布 (平均值)

Fig. 1 The weight distribution of different soil aggregates in different soil layers

管不同粒径团聚体间分布差异比较明显,但在不同土层各团聚体的分布规律基本相似。

## 2.2 土壤团聚体中有机氮库分布

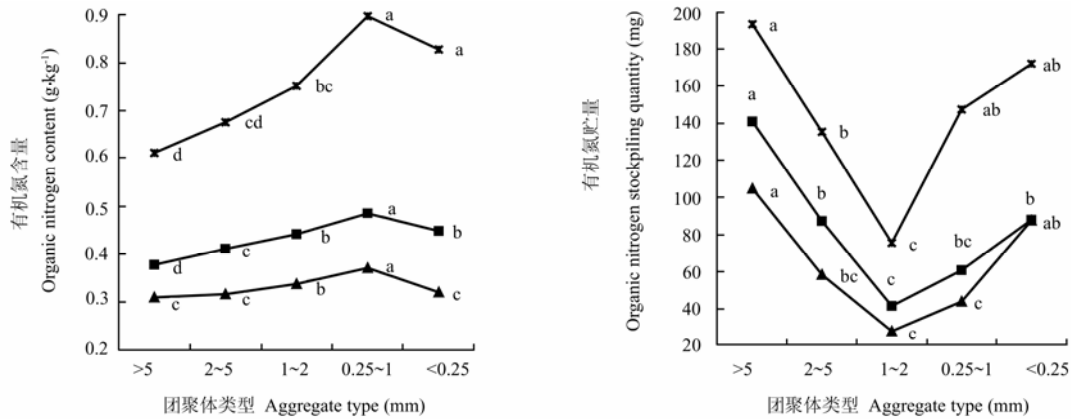
土壤全氮包括有机态氮和矿质态氮两部分,植物对土壤氮特别是有机氮的可矿化氮具有很高的依赖

性<sup>[12]</sup>。人们很早试图用有机氮来作为土壤供氮能力指标,因而研究土壤有机氮含量和贮量在不同土壤团聚体中的分布,对深入理解土壤供氮能力更具重要科学价值。试验测定结果表明(图2),不同土壤团聚体,其有机氮含量明显不同,各土层,>5 mm、2~5 mm、1~2 mm、0.25~1 mm 粒级团聚体有机氮含量依次呈递增趋势,从0.25~1 mm 到<0.25 mm 团聚体,有机氮含量呈下降趋势,以0.25~1 mm 团聚体有机氮含量最大,其中各层土壤0.25~1 mm 与>5 mm、2~5 mm 团聚体有机氮平均含量差异均达显著水平,其分布规律与有机碳含量基本相同<sup>[13]</sup>,但趋势更加明显。这主要是由于氮素在土壤中主要以有机氮的形态存在,其含量与土壤有机碳密切相关,由于有机碳在不同团聚体中分布的差异,从而造成有机氮含量分布的差异,这与徐阳春<sup>[8]</sup>、孙天聪<sup>[9]</sup>的结果基本类似。

土壤各团聚体有机氮贮量是不同粒级团聚体有机氮含量与相应团聚体质量的乘积,其数值能够反映土壤有机氮库在大小不同团聚体中的真实贮量,同时也能够反映不同粒级中有机氮对整体土壤有机氮的贡献率。本研究发现(图2),总体看,由表层向下,不同团聚体有机氮贮量均呈递减趋势。>5 mm、2~5 mm、1~2 mm 粒级的团聚体,有机氮贮量依次呈递减趋势;而1~2 mm、0.25~1 mm、<0.25 mm 粒级的团聚体的有机氮贮量依次呈递增趋势,1~2 mm 团聚体出现最低值。因此可以看出,不同粒级团聚体中的有机氮对整个土壤有机氮的贡献率以>5 mm 团聚体最大(表3),在0~20 cm、20~40 cm 和40~60 cm 土层中,>5 mm 团聚体中有机氮贮量分别占各层有机氮总贮量的26.74%、33.74%和32.49%,平均为30.01%;1~2 mm 团聚体中有机氮贮量最低,仅占各层有机氮总贮量的10.42%、9.93%和8.59%,平均为9.88%。Balabane<sup>[14]</sup>用<sup>15</sup>N 标记的有机物所获得的粘粒中新近固定的氮很快汇集到微团聚体中,本试验结果也表明,对<0.25 mm 微团聚体有机氮贮量仅次于>5 mm,表明>5 mm 和<0.25 mm 粒级团聚体在土壤有机氮的贮存和转化过程中有重要作用。

## 2.3 土壤团聚体中矿质态氮库的分布

土壤矿质态氮主要来源于有机氮的矿化和施入的肥料等,其含量具有很大的时空变异性。本研究结果表明(图3),无论哪种团聚体,土壤矿质态氮含量随土层深度增加而降低。从各土层各团聚体矿质态氮所占全氮比例来看,0~20 cm 土层在1.58%~1.96%之间,20~40 cm 土层在2.20%~2.43%之间,40~60



贮量为每千克土壤各粒级团聚体有机氮的贮存量。下同  
Stockpiling quantity is the weight of organic nitrogen in each class of aggregate per 1kg soil. The same as below

图 2 土壤不同团聚体有机氮含量及其贮存量分布

Fig. 2 Content and stockpiling quantity of organic nitrogen distribution of different soil aggregates in different soil layers

表 3 土壤不同团聚体有机氮贮量占土壤有机氮总贮量的百分比

Table 3 Percentage of stockpiling quantity of organic nitrogen in each class of aggregate to total stockpiling quantity of soil (%)

土层 Layer (cm)	团聚体类型 Aggregate type (mm)				
	>5	2~5	1~2	0.25~1	<0.25
0~20	26.74	18.69	10.42	20.36	23.78
20~40	33.74	20.81	9.93	14.53	20.99
40~60	32.49	18.13	8.59	13.58	27.21

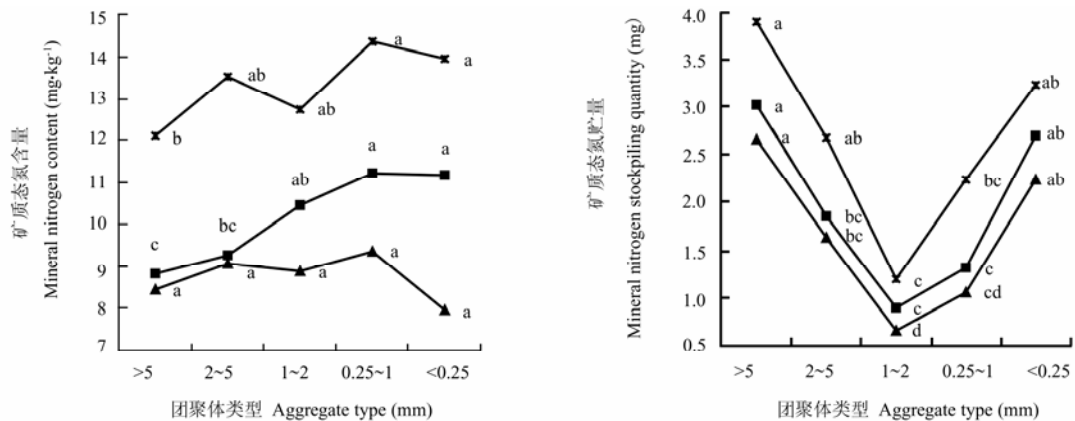


图 3 土壤不同团聚体矿质态氮含量及其贮存量分布

Fig. 3 Content and stockpiling quantity of mineral nitrogen distribution of different soil aggregates in different soil layers

cm 土层在 2.43%~2.79%之间，所占全氮的比例依次有所增加，原因在于随土壤深度增加，全氮的下降幅度大于矿质态氮的下降幅度。从矿质态氮在各级团聚体中分布来看，由于矿质态氮特别是 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 活性强，易被作物和微生物吸收利用，同时还可通过不同途径从土壤中损失掉，其规律性没有有机氮明显，但仍然

以 0.25~1 mm 团聚体矿质态氮含量最高。对于不同团聚体中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量的分布（图 4），没有明显的规律性，这主要由于在旱地土壤中，NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 很快经硝化作用转化为 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N，NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量低而稳定。不同团聚体中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量的分布，大体上随团聚体粒级变小，其含量呈增加的趋势，这可能与较小团聚体内部

小孔隙溶液中  $\text{NO}_3^-$ -N 含量较高有关, 过去也有人发现<sup>[15]</sup>, 在团聚体内小孔隙溶液中含有较高的  $\text{NO}_3^-$ -N, 说明土壤氮素更容易在细小颗粒中富集。

由于土壤矿质态氮在各团聚体中差异有限, 因此, 土壤矿质态氮在团聚体中贮量分布规律与团聚体重量分布规律基本相同 (图 3~5), 只是数值上有差异, 均呈现先减小、再增大的分布特征, 说明不同团聚体中矿质态氮贮量主要受土壤团聚体质量的影响。

#### 2.4 土壤类型对不同团聚体氮素分布的影响

土壤水平地带分布是土壤发生性状与气候生物带分布相吻合的土壤类型分布<sup>[16]</sup>。从表 4 可以看出, 对于黄土高原地区土壤, 土壤中各级团聚体的氮含量随纬度增加而降低, 总体上看, 土垫旱耕人为土各级别团聚体含氮最高, 有机氮含量在  $1.06\sim 1.23\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  之

间, 矿质态氮含量在  $19.93\sim 31.58\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间, 以干润砂质新成土各级别团聚体含氮最低, 有机氮含量在  $0.22\sim 0.34\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间, 矿质态氮含量在  $7.24\sim 8.63\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间。

土壤有机氮含量 4 种土壤类型均以  $0.25\sim 1\text{ mm}$  团聚体最高, 且不同团聚体之间均差异显著, 对土壤团聚体的矿质态氮含量, 由于其易受偶然因素的影响, 变化性强, 土壤类型对其分布影响相对较小, 其在团聚体中的分布规律不明显。就贮量而言, 无论是有机氮还是矿质态氮, 由于主要受团聚体重量分布的影响, 二者在团聚体中的分布规律基本相似, 均表现为, 干润砂质新成土和黄土正常新成土氮贮量以  $<0.25\text{ mm}$  团聚体所占比例最大, 有机态氮分别为  $40.38\%$  和  $28.27\%$ , 矿质态氮分别为  $37.31\%$  和  $31.18\%$ ; 而筒育

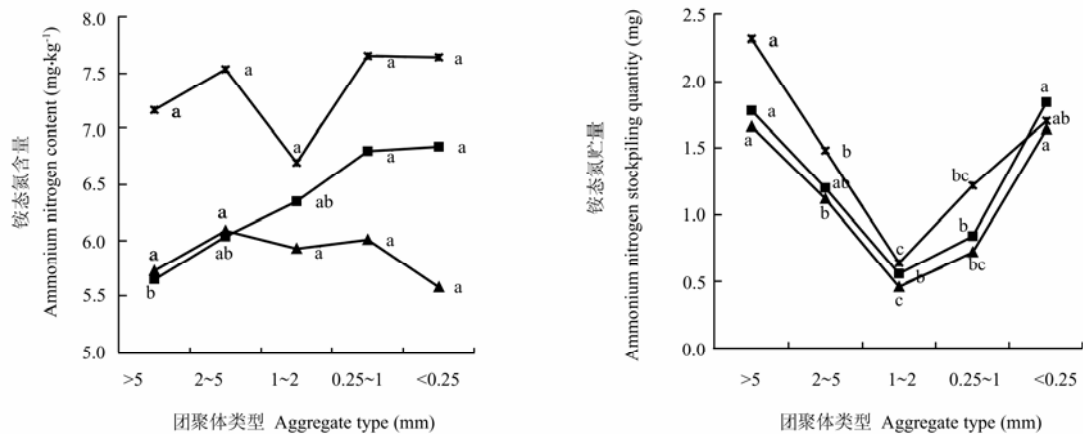


图 4 土壤不同团聚体铵态氮含量及其贮存量分布

Fig. 4 Content and stockpiling quantity of ammonium nitrogen distribution of different soil aggregates in different soil layers

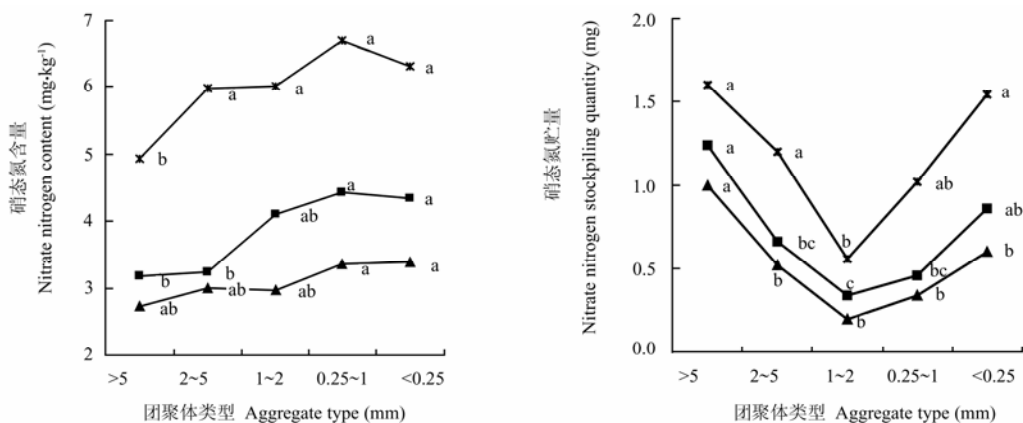


图 5 土壤不同团聚体硝态氮含量及其贮存量分布

Fig. 5 Content and stockpiling quantity of nitrate nitrogen distribution of different soil aggregates in different soil layers

表 4 不同土壤不同团聚体有机氮和矿质态氮含量及其贮存量

Table 4 Content and stockpiling quantity of organic nitrogen and mineral nitrogen in different soil aggregates with different soil types (0-20 cm)

土壤类型 Soil type	样品数 Sample number	指标 Index	团聚体类型 Aggregate type (mm)				
			>5	2~5	1~2	0.25~1	<0.25
干润沙质新成土 Ust-Sandic Entisols	6	有机氮含量 Organic nitrogen content(g·kg <sup>-1</sup> )	0.22c	0.24c	0.28b	0.34a	0.29b
		有机氮贮量 Organic nitrogen stockpiling quantity (mg)	45.78b	46.18b	22.86c	44.02bc	107.54a
		矿质态氮含量 Mineral nitrogen content (mg·kg <sup>-1</sup> )	7.24c	8.24ab	8.62a	8.63a	7.62bc
黄土正常新成土 Los-Orthic Entisols	10	有机氮含量 Organic nitrogen content(g·kg <sup>-1</sup> )	0.73c	0.82c	0.93c	1.18a	1.09ab
		有机氮贮量 Organic nitrogen stockpiling quantity (mg)	182.56b	157.96bc	95.78c	215.90ab	257.00a
		矿质态氮含量 Mineral nitrogen content(mg·kg <sup>-1</sup> )	12.21c	14.57abc	13.19bc	16.15a	15.20ab
筒育干润均腐土 Hap-Ustic Isohumisols	4	有机氮含量 Organic nitrogen content(g·kg <sup>-1</sup> )	0.69b	0.76ab	0.81a	0.86a	0.78ab
		有机氮贮量 Organic nitrogen stockpiling quantity (mg)	273.34a	156.02b	84.70c	133.54b	110.02bc
		矿质态氮含量 Mineral nitrogen content (mg·kg <sup>-1</sup> )	11.00a	13.93a	14.12a	12.88a	11.49a
土垫旱耕人为土 Eum-Orthic Anthrosols	2	有机氮含量 Organic nitrogen content (g·kg <sup>-1</sup> )	1.06b	1.08b	1.13ab	1.23a	1.21a
		有机氮贮量 Organic nitrogen stockpiling quantity (mg)	531.38a	247.08b	112.30b	141.84b	64.52b
		矿质态氮含量 Mineral nitrogen content (mg·kg <sup>-1</sup> )	28.45ab	23.26ab	19.93b	25.54ab	31.58a
		矿质态氮贮量 Mineral nitrogen stockpiling quantity (mg)	14.38a	5.32b	1.98b	3.10b	1.68b

同一行中不同字母表示差异显著。下同

Different letters in same row mean significant difference ( $P<0.05$ ). The same as below

干润均腐土和土垫旱耕人为土氮贮量以>5 mm 团聚体所占比例最大, 有机态氮分别为 36.08%和 48.43%, 矿质态氮分别为 36.21%和 51.35%, 差异均达显著水平, 这种差异显然与团聚体质量分布不同有关。

## 2.5 植被类型对不同团聚体氮素分布的影响

植物通过从土壤中吸收矿质态氮, 同时将同化形成的部分有机氮又返回土壤, 因此, 植被对土壤氮素循环及土壤氮素分布具有重要意义。本研究以黄土正常新成土 0~20 cm 土层为对象, 讨论不同植被下土壤各级团聚体氮素分布状况, 结果表明(表 5), 不同植被下土壤各级团聚体氮素含量具有一定差异, 大体上, 有机氮含量表现为自然林地(1.12~2.34 g·kg<sup>-1</sup>)>新垦农田(0.86~1.09 g·kg<sup>-1</sup>)>人工林地(0.48~1.19 g·kg<sup>-1</sup>)>农地(0.62~0.85 g·kg<sup>-1</sup>); 矿质态氮含量表现为自然林地(14.81~23.39 mg·kg<sup>-1</sup>)>人工林地(11.76~15.28 mg·kg<sup>-1</sup>)≈农地(11.65~16.14 mg·kg<sup>-1</sup>)>新垦农田(8.77~15.11 mg·kg<sup>-1</sup>)。自然林地具有丰富的植物多样性, 地面枯落物较多, 将养分富集于土壤表层, 土壤很少扰动, 有利于形成和增加土壤有机氮含量, 因此有机氮矿化的基数大, 其矿质态氮含量也高于其它植被条件下的土壤; 试验所用的新垦农田由于自然林地开垦时间不长, 土壤有机氮含量也相对较高; 人工林地由农田土壤退耕形成, 由于

退耕时间较短, 每年输入土壤有机氮有限, 因此人工林地含氮量比自然林地低; 而农地由于耕种时间悠久, 表层通气又好, 微生物活动强烈, 有机质分解快, 土壤各形态氮素指标均表现较低。因此本研究说明植被恢复过程中, 有利于增加土壤氮“库”。

对于不同团聚体(表 5), 农地和人工林地有机氮含量以 0.25~1 mm 团聚体最高, 分别为 0.85 g·kg<sup>-1</sup>和 1.19 g·kg<sup>-1</sup>, 自然林地和新垦农田有机碳含量以<0.25 mm 团聚体最高, 分别为 2.23 g·kg<sup>-1</sup>和 1.09 g·kg<sup>-1</sup>; 对矿质态氮含量, 农地以 0.25~1 mm 团聚体最高, 为 16.14 mg·kg<sup>-1</sup>, 人工林和自然林以<0.25 mm 团聚体最高, 分别为 15.28 mg·kg<sup>-1</sup>和 23.39 mg·kg<sup>-1</sup>, 新垦农田以 2~5 mm 团聚体最高, 为 15.11 mg·kg<sup>-1</sup>。然而, 无论是有机氮贮量还是矿质态氮贮量, 农地和人工林地以<0.25 mm 团聚体中最大, 有机氮贮量分别为 243.66 mg 和 314.18 mg, 矿质态氮贮量分别为 5.28 mg 和 6.64 mg; 对自然林地, 有机氮贮量以 0.25~1 mm 团聚体中最大, 为 416.36 mg; 矿质态氮贮量以>5 mm 团聚体中最大, 为 5.44 mg; 对新垦农田有机氮和矿质态氮贮量均以 0.25~1 mm 团聚体中最大, 分别为 284.58 mg 和 3.06 mg。这进一步说明植被通过影响土壤团聚化过程而导致不同团聚体氮含量与贮量发生差异<sup>[17]</sup>。

表 5 不同植被不同团聚体有机氮和矿质态氮含量及其贮存量

Table 5 Content and stockpiling quantity of organic nitrogen and mineral nitrogen in different soil aggregates with different vegetation types (0-20 cm)

植被 Vegetation type	样品数 Sample number	指标 Index	团聚体类型 Aggregate type (mm)				
			>5	5~2	2~1	1~0.25	<0.25
农地 Farming land	3	有机氮含量 Organic nitrogen content ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	0.63c	0.65c	0.72b	0.85a	0.62c
		有机氮贮量 Organic nitrogen stockpiling quantity (mg)	149.32b	109.9bc	47.30c	113.08bc	243.66a
		矿质态氮含量 Mineral nitrogen content ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	11.65b	14.26ab	13.25b	16.14a	13.22b
		矿质态氮贮量 Mineral nitrogen stockpiling quantity (mg)	2.82b	2.34b	0.84b	2.10b	5.28a
人工林地 Artificial forest land	3	有机氮含量 Organic nitrogen content ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	0.48b	0.57b	0.74b	1.19a	0.74b
		有机氮贮量 Organic nitrogen stockpiling quantity (mg)	102.74bc	97.90bc	50.84c	139.26b	314.18a
		矿质态氮含量 Mineral nitrogen content ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	11.76a	13.27a	12.61a	15.18a	15.28a
		矿质态氮贮量 Mineral nitrogen stockpiling quantity (mg)	2.38b	2.28b	0.86b	1.80b	6.64a
自然林地 Natural forest land	2	有机氮含量 Organic nitrogen content ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	1.12b	1.39b	1.53ab	1.82ab	2.34a
		有机氮贮量 Organic nitrogen stockpiling quantity (mg)	355.12ab	303.00ab	195.36b	416.36a	261.68ab
		矿质态氮含量 Mineral nitrogen content ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	17.16a	16.42a	14.81a	23.08a	23.39a
		矿质态氮贮量 Mineral nitrogen stockpiling quantity (mg)	5.44a	3.54b	1.90c	5.22a	2.56bc
新垦农田 Fresh assart	2	有机氮含量 Organic nitrogen content ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	0.86e	0.90d	0.95c	1.00b	1.09a
		有机氮贮量 Organic nitrogen stockpiling quantity (mg)	179.60a	175.16a	136.34a	284.58a	186.50a
		矿质态氮含量 Mineral nitrogen content ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	8.77a	15.11a	12.36a	10.68a	9.83a
		矿质态氮贮量 Mineral nitrogen stockpiling quantity (mg)	1.80a	3.04a	1.70a	3.06a	1.70a

### 3 讨论

陈恩凤等<sup>[18]</sup>研究发现, 土壤有机质与土壤团聚体之间存在着密切关系, 它是土壤团聚体的主要胶结剂, 孙天聪等<sup>[9]</sup>研究表明, 长期施肥处理耕层土壤有机质、全氮在不同粒级团聚体中的分布呈现较大差异, 并且在各级团聚体也呈现出较强的分布规律, 0.25~1 mm 粒级团聚体中养分含量占优势。本研究与过去的研究资料具有类似结果。本试验结果表明, 不同土壤团聚体, 其有机氮和矿质态氮含量明显不同, 均以 0.25~1 mm 团聚体有机氮和矿质态氮含量最大, 说明土壤在团聚化过程, 特别是土壤颗粒从微团粒 (<0.25 mm) 到团粒 (>0.25 mm) 的转化过程中, 土壤氮素起着极其重要的作用。这与土壤有机质在多年保护性种植或耕作后, 新有机质的固定主要发生在 <0.25 mm 团聚体中的结果相吻合<sup>[19]</sup>。由于土壤有机碳、氮关系是“共济”关系<sup>[20]</sup>, 在一般情况下, 土壤有机碳与有机氮具有显著的相关关系。因此, 在研究土壤团聚化过程时, 应该从土壤有机碳、氮等多角度进行综合分析, 对土壤有机碳方面笔者已有研究报道<sup>[13]</sup>。

土壤氮库处在不断累积与分解的动态过程中, 其含量决定于累积速度和分解速度的相对强度, 而生物累积与分解的相对强度又与植被、气候、地形、土壤类型、质地、耕作、施肥措施等条件密切相关<sup>[21]</sup>。薛晓辉等<sup>[22]</sup>对陕北黄土高原地区不同年限、不同植被立

地土壤有机质和养分含量的分析发现, 土壤有机质和全氮受地理位置影响, 随纬度北移而减小, 其顺序为: 富县>宜川>安塞>神木。本研究结果表明, 对于黄土高原地区土壤, 土壤中各级团聚体的氮含量随纬度的增加而降低, 总体上看, 土垫早耕人为土各级别团聚体含氮最高, 以干润砂质新成土各级别团聚体含氮最低。以上结果进一步说明: 尽管土壤有机质和氮含量及贮量受到植被、气候、施肥等多种因素的影响, 但某一地区土壤有机质和氮的含量和贮量, 则是该土壤在特定条件下累积和分解之间的一个平衡值<sup>[23]</sup>, 因此, 其氮含量和贮量以及在团聚体中的分布具有相对稳定的特征。

大量研究表明<sup>[24,25,27,28]</sup>, 黄土高原地区生态环境建设对土壤氮库具有一定的影响。张俊华等<sup>[24]</sup>在野外调查分析的基础上, 测定了沙棘、黄刺玫、油松以及草地和农田土壤全氮含量, 结果表明: 黄土高原半湿润地区恢复植被能够显著提高土壤全氮含量, 且草地>沙棘>黄刺玫>油松; 张红等<sup>[25]</sup>以黄土丘陵沟壑区子午岭次生林区为研究区域, 研究了不同植被覆盖对土壤养分状况的影响, 结果表明, 不同植被覆盖类型下, 土壤全氮含量为乔木>草本>灌木>农田>弃耕地; 有效氮含量为乔木>灌木≈草本>农田>弃耕地; 本研究结果也表明, 在不同植被下有机氮含量表现为自然林地>新垦农田>人工林地>农地。因此, 在黄土高原植被恢复过程中, 能显著提高土壤氮含量, 促进土壤氮素



的生物固定, 增加土壤氮素的表聚性。相反, 黄土高原植被破坏会显著降低土壤氮素含量, 郑粉莉等<sup>[26]</sup>对黄土高原子午岭林区植被破坏对土壤肥力影响的研究表明, 随开垦年限增加, 土壤有机质、氮含量显著减少, 同时, 在黄土坡面土壤侵蚀变化是导致土壤氮库变化的主要原因之一<sup>—[27,28]</sup>。

## 4 结论

4.1 不同大小结构体在土壤中所占的比例明显不同, 各土层从>5 mm、2~5 mm、1~2 mm 结构体含量依次呈下降趋势, 而 1~2 mm、0.25~1 mm、<0.25 mm 结构体含量呈递增趋势, 以 1~2 mm 粒级结构体所占比例最小。

4.2 从表层向下, 无论哪种团聚体, 其有机氮、矿质氮、铵态氮、硝态氮含量皆呈递减趋势。各土层, >5 mm、2~5 mm、1~2 mm、0.25~1 mm 粒级团聚体有机氮含量依次呈递增趋势, 从 0.25~1 mm、<0.25 mm 团聚体, 有机氮含量呈下降趋势, 以 0.25~1 mm 团聚体有机氮含量最大; 由于矿质氮易受各种环境因素的影响, 其规律性没有全氮、有机碳明显。

4.3 由于不同大小团聚体所占比例不同, 无论是土壤有机氮, 还是矿质氮, 贮量在土壤团聚体中的分布与含量并不完全一致。其贮量在土壤团聚体中的分布均表现为: >5 mm、2~5 mm、1~2 mm 粒级结构体中贮量依次呈递减趋势, 而 1~2 mm、0.25~1 mm、<0.25 mm 依次呈递增趋势, 以 1~2 mm 结构体贮量最低。

4.4 黄土高原地区主要土壤中各级团聚体的含氮量随纬度增加而降低, 土垫旱耕人为土各级别团聚体含氮量最高, 干润砂质新成土各级别团聚体含氮量最低。不同植被下土壤各级团聚体氮素分布存在一定差别, 无论是有机氮, 还是矿质氮, 其含量大体上均表现为自然林地>新垦农田>人工林>农地, 说明植被恢复过程中, 不仅增加了土壤氮“库”的储存, 同时能增加土壤氮素供应“流”的强度。

## References

[1] Cabrera M L, Kissel D E, Vigil M F. Nitrogen mineralization from organic residues: research opportunities. *Journal of Environmental Quality*, 2005, 34: 75-79.

[2] Ma B L, Dwyer L M, Gregorich E G. Soil nitrogen amendment effects on seasonal nitrogen mineralization and nitrogen cycling in maize production. *Agronomy Journal*, 1999, 91: 1003-1009.

[3] 任书杰, 曹明奎, 陶波, 李克让. 陆地生态系统氮状态对碳循环的限制作用研究进展. *地理科学进展*, 2006, 25(4): 58-67.

Ren S J, Cao M K, Tao B, Li K R. The effects of nitrogen limitation on terrestrial ecosystem carbon cycle: a review. *Progress in geography*, 2006, 25(4): 58-67. (in Chinese)

[4] 李贵桐, 赵紫娟, 黄元仿, 李保国. 秸秆还田对土壤氮素转化的影响. *植物营养与肥科学报*, 2002, 8: 162-167.

Li G T, Zhao Z J, Huang Y F, Li B G. Effect of straw returning on soil nitrogen transformation. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8: 162-167. (in Chinese)

[5] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 尿素与 DCD 和有机物料配施条件下氮素的转化和去向. *中国农业科学*, 2002, 35: 181-186.

Ju X T, Liu X J, Zhang F S. Nitrogen transformation and fate in soil under the conditions of mixed application of urea with DCD or different organic materials. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35: 181-186. (in Chinese)

[6] 崔远来, 李远华, 吕国安, 沙宗尧. 不同水肥条件下水稻氮素转移与转化规律研究. *水科学进展*, 2004, 15: 280-285.

Cui Y L, Li Y H, Lu G A, Sha Z Y. Nitrogen movement and transformation with different water supply for paddy rice. *Advances in Water Science*, 2004, 15: 280-285. (in Chinese)

[7] Christensen B T, Olesen J E. Nitrogen mineralization potential of organomineral size separates from soils with annual straw incorporation. *European Journal of Soil Science*, 1998, 49: 25-36.

[8] 徐阳春, 沈其荣. 长期施用不同有机肥对土壤各粒级复合体中 C、N、P 含量与分配的影响. *中国农业科学*, 2000, 33(5): 65-71.

Xu Y C, Shen Q R. Influence of long-term application of manure on the contents and distribution of organic C, total N and P in soil particle-sizes. *Scientia Agricultura Sinica*, 2000, 33 (5): 65-71. (in Chinese)

[9] 孙天聪, 李世清, 邵明安. 长期施肥对褐土有机碳和氮素在团聚体中分布的影响. *中国农业科学*, 2005, 38: 1841-1848.

Sun T C, Li S Q, Shao M A. Effects of long-term fertilization on distribution of organic matters and nitrogen in cinnamon soil aggregates. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38: 1841-1848. (in Chinese)

[10] 龚子同. 中国土壤系统分类. 北京: 科学出版社, 1999.

Gong Z T. *Chinese Soil Taxonomy*. Beijing: Science Press, 1999. (in Chinese)

[11] 中国科学院南京土壤研究所主编. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978: 514-518.

Institute of Soil Science, Chinese Academy of Science. *Physical and Chemical Analysis of Soil*. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978: 514-518. (in Chinese)

[12] 巨晓棠, 李生秀. 土壤可矿化氮对作物吸氮量的贡献. *干旱地区农业研究*, 1996, 14(4): 30-33.

Ju X T, Li S X. The contribution of mineralizable soil N to crop N

- uptake. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1996, 14(4): 30-33 (in Chinese)
- [13] 刘毅,李世清,邵明安,张月霞.黄土高原不同土壤团聚体有机碳库的分布. *应用生态学报*, 2006, 17: 1003-1008.  
Liu Y, Li S Q, Shao M A, Zhang Y X. Distribution of the soil organic carbon pools in different kinds of soil aggregate in the Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17: 1003-1008. (in Chinese)
- [14] Balabane M. Turnover of clay-associated organic nitrogen in the different aggregate-size classes of a cultivated silty loam. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47: 285-291.
- [15] 张庆忠,陈欣,沈善敏.农田土壤硝酸盐积累与淋失研究进展. *应用生态学报*, 2002, 13: 233-238.  
Zhang Q Z, Chen X, Shen S M. Advances in studies on accumulation and leaching of nitrate in farming soil. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13: 233-238. (in Chinese)
- [16] 王秀红.我国水平地带性土壤中有机的空间变化特征. *地理科学*, 2001, 21(1): 19-23.  
Wang X H. Spatial variation of organic matter in horizontal zonal soils in China. *Scientia Geographica Sinica*, 2001, 21(1): 19-23. (in Chinese)
- [17] 姜培坤,周国模,钱新标.侵蚀型红壤植被恢复后土壤养分含量与物理性质的变化. *水土保持学报*, 2004, 18(1): 12-14,30.  
Jiang P K, Zhou G M, Qian X B. Changes in soil nutrients and physical properties under erosion red soil by vegetation recovery. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(1):12-14,30. (in Chinese)
- [18] 陈恩凤,关连珠,汪景宽,颜丽,王铁宇,张继宏,周礼恺,陈利军,李荣华.土壤特征微团聚体的组成比例与肥力评价. *土壤学报*, 2001, 38(1): 49-53.  
Chen E F, Guan L Z, Wang J K, Yan L, Wang T Y, Zhang J H, Zhou L K, Chen L J, Li R H. Compositiional proportion of soil characteristic microaggregates and soil fertility evaluation. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(1): 49-53. (in Chinese)
- [19] Gerzabek M H, Haberhauer G, Kirchmann H. Soil organic matter pools and carbon<sup>213</sup> natural abundance in particle-size fractions of a long-term agricultural field experiment receiving organic amendments. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65: 352-358.
- [20] 项文化,黄志宏,闫文德,田大伦,雷丕锋.森林生态系统碳氮循环功能耦合研究综述. *生态学报*, 2006, 26: 2365-2372.  
Xiang W H, Huang Z H, Yan W D, Tian D L, Lei P F. Review on coupling of interactive functions between carbon and nitrogen cycles in forest ecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26: 2365-2372. (in Chinese)
- [21] 周志华,肖化云,刘丛强.土壤氮素生物地球化学循环的研究现状与进展. *地球与环境*, 2004, 32(3-4): 21-26.  
Zhou Z H, Xiao H Y, Liu C Q. Research status and advances in biogeochemical cycling nitrogen in soils. *Earth and Environment*, 2004,32(3-4):21-26. (in Chinese)
- [22] 薛晓辉,卢芳,张兴昌.陕北黄土高原土壤有机质分布研究. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2005, 33(6): 69-74.  
Xue X H, Lu F, Zhang X C. Distribution of soil organic matters on loess plateau of Northern Shaanxi. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry (Nature Science Editor)*, 2005, 33(6): 69-74. (in Chinese)
- [23] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J. Soil carbon pools and world life zones. *Nature*, 1982, 298(8): 156-159.
- [24] 张俊华,常庆瑞,贾科利,陈涛,岳庆玲,李云驹.黄土高原植被恢复对土壤肥力质量的影响研究. *水土保持学报*, 2003, 17(4): 38-41.  
Zhang J H, Chang Q R, Jia K L, Chen T, Yue Q L, Li Y J. Effect of plant restoration to soil fertility quality on loess plateau. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003,17(4):38-41 (in Chinese)
- [25] 张红,吕家珑,赵世伟,周群,陈小燕.不同植被覆盖下子午岭土壤养分状况研究. *干旱地区农业研究*, 2006, 24(2): 66-69.  
Zhang H, Lü J L, Zhao S W, Zhou Q, Chen X Y. Studies on soil nutrients under different vegetation types in the Ziwuling Area. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2006, 24(2): 66-69. (in Chinese)
- [26] 郑粉莉,高学田.坡面土壤侵蚀过程研究进展. *地理科学*, 2003, 23(2): 230-235.  
Zheng F L, Gao X T. Research progresses in hill slope soil erosion processes. *Scientia Geographica Sinica*, 2003, 23(2): 230-235. (in Chinese)
- [27] 贾科利,常庆瑞,王占礼,张俊华,齐雁冰.陕北坡耕地土壤侵蚀对土壤性质的影响研究. *中国生态农业学报*, 2006, 14(1): 96-99.  
Jia K L, Chang Q R, Wang Z L, Zhang J H, Qi Y B. Effects of soil erosion on the soil properties in slope cropland of northern Shaanxi. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006, 14(1): 96-99. (in Chinese)
- [28] 陈世宝,华珞,何忠俊,韦成普,夏侯国风,李勇.黄土高原陡坡耕地土壤侵蚀对土壤性质的影响. *农业环境保护*, 2002, 21: 289-292.  
Chen S B, Hua L, He Z J, Wei D P, Xiahou G F, Li Y. Effect of soil erosion on soil properties in deep cultivated hill slope in Loess Plateau. *Agro-environmental Protection*, 2002, 21: 289-292. (in Chinese)

(责任编辑 李云霞)