

# 青海大通退耕还林地土壤理化性状演变研究

李世荣<sup>1</sup>, 李永贵<sup>1</sup>, 段淑怀<sup>1</sup>, 周心澄<sup>2</sup>

(1. 北京市水土保持工作总站, 100038; 2. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083)

**摘要:**生物的生存与发展与土壤密不可分, 研究土壤的变化对于整个生态修复过程意义重大。探讨退耕还林工程对土壤理化性状的影响, 可以为工程的顺利实施提供相关科学依据。在标准地内典型地段挖取剖面, 并用环刀每隔 10 cm 分层取土样, 并测定土壤的理化指标。结果表明: 在 0 - 20 cm 土层, 淋溶棕褐土总孔隙度、毛管孔隙度和最小持水量随退耕还林年限增长其变化规律基本一致, 呈不规则的“S”型曲线; 有机质和碳的变幅以农耕地、退耕 18 a 和 32 a 天然林最大, 呈“V”型变化; 土壤 C/N 趋于减小, 表明在退耕还林地上土壤氮素供应充足。在 0 - 20 cm 土层, 土壤密度与全氮、碳含量负相关, 与黏粒含量正相关, 而在 20 - 40 cm 土层, 土壤密度与全氮、碳含量和黏粒含量均呈极显著正相关。当各种外应力侵蚀土壤时, 对土壤的损伤随侵蚀深度加深而加重; 由于土壤黏粒与全氮、碳含量正相关, 土壤黏粒减少导致土壤的氮素衰减和稳定性降低。

**关键词:**退耕还林; 土壤理化性状; 演变

**中图分类号:** S153

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2009)02-0132-06

## Study on Changes of Soil Physiochemical Property Under Converting Cropland to Forest in Datong of Qinghai Province

LI Shi-rong<sup>1</sup>, LI Yong-gui<sup>1</sup>, DUAN Shu-huai<sup>1</sup>, ZHOU Xin-cheng<sup>2</sup>

(1. Beijing Soil and Water Conservation Center, Beijing 100038, China; 2. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The soil is very important for survival and development of biological and researching the change of soil physiochemical properties are significance for the process of ecological remediation. The study on the impacts of converting cropland to forest for physiochemical property of soil could provide scientific bases for the project development favorably. We collect the samples from the sections every ten centimeters from the top to the bottom in sample plot with the cutting ring and test the physical and chemical properties. The results showed that in the soil genetic horizon of 0 - 20 cm, with the age increasing of converting cropland to forest; the porosity, capillary porosity, and the minimum water-holding capacity took on the uniform trend of 'S' curve, and the organic content and carbon content showed 'V' curve, the maximum occurred in the arable land and 18 a and 32 a natural forests of converting cropland to forest; the C/N took on down trend, indicating that the N was in under-supply in the converting cropland to forest. In addition, in the soil genetic horizon of 0 - 20 cm, the soil density is negatively related to the N content and C content, and positively related to clay content. However, in the 20 - 40 cm soil horizon, the soil density is significant positively to the content of N, C and clay particle. When the soil erosion occurred by the different exogenic forces, the soil damage degree increased with the soil horizon deepening. Due to the content of clay particle is positively correlated with the content of N and the content of C, so the decreasing of clay led to the attenuation and stability falling of N.

**Key words:** converting cropland to forest; physiochemical property; changes

\* 收稿日期: 2008-10-10

基金项目: 国家“十五”攻关课题项目 (2001BA510B0102)

作者简介: 李世荣 (1975 - ), 男, 山西昔阳人, 博士, 高级工程师, 研究方向: 水土保持与生态环境工程。E-mail: lishirong1975 @126.com

土壤是地球陆地表面能够生长植物的疏松层,是固体、液体和气体物质共同组成的复杂系统,是地表物质和能量转化交换的活动场所。它以不完全连续的“土被”形式覆盖于陆地表面,形成“土壤圈”<sup>[1-2]</sup>。就其在地理环境中的空间位置而言,土壤圈处于岩石圈、水圈、大气圈、生物圈相互紧密交接的地带,它既是连接各自然地理要素的纽带,又是结合无机界和有机界的中心环节<sup>[3-6]</sup>。生态修复过程是一个十分复杂的过程,是由物理、化学、生物等多个不同属性的过程组合而成<sup>[7-9]</sup>。与人类生存和发展最直接相关的过程是生态修复的生物过程,而生物的生存与发展又是与土壤密不可分的,因此,研究土壤的变化对于整个生态修复过程意义重大。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

研究在北京林业大学青海大通退耕还林试验地

进行,地处青海省大通县塔儿沟镇塔儿沟村(100°51′ - 101°56′ E,36°43′ - 37°23′ N),平均海拔 2 660 m。大通县主要造林树种有:青海云杉(*Picea asperata* Mast.)、华北落叶松(*Larix gmeini* Rupr)、白桦(*Betula platyphylla* Suk.)、青杨(*Populus cathayana* Rehd.)、中国沙棘(*Hippophae rhamnoides* L.)、小檗(*Berberis thumbergii* DC.)。试验地位于大通县地处半浅山半脑山地区,该地区属暖温带大陆性季风气候,干燥度 0.71。据大通县气象站 1975 - 1992 年资料统计,该地区多年平均降水量 457.8 mm,且年内分配非常不均,6 - 9 月降水占全年的 71%,无霜期 97 d,多年平均水面蒸发量 834.2 mm,最大蒸发出现在 4 - 6 月,表现出典型的北方春旱的特征。试验区土壤类型为黄土母质上发育的淋溶棕褐土和栗钙土,土壤深厚。试验区总面积 376 hm<sup>2</sup>,林地面积 217 hm<sup>2</sup>,耕地面积 160 hm<sup>2</sup>,平均粮食单产 3 750 kg/hm<sup>2</sup>,其调查标准地如表 1 所示。

表 1 标准地基本情况

植被类型	年龄/ a	海拔/ m	坡度/(°)	坡位	坡向	面积/ m <sup>2</sup>	密度/ (株·hm <sup>-2</sup> )	平均胸径/ cm	平均树高/ m	郁闭度/ %
小麦	1	2830	8.0	中	N120	1	2100000	-	-	-
5 青杨+5 白桦	3/3	2850	10.0	中	N330	400	2500/2500	-	2.3/2.1	21
青海云杉+中国沙棘	8/6	2875	17.7	中	N340	400	2000/5000	3.41/2.41	5.7/2.2	42
华北落叶松	18	2970	19.2	上	N30	400	2000	7	7.15	93
青杨+中国沙棘	20	2830	21.5	中	N120	400	920/300	9.7	9.5	30
白桦	19	2950	16.3	上	N350	400	2500	9.2	8.8	96
7 青海云杉+3 青杨	16/13	2900	20.2	上	N340	400	2660/1140	5.36/9.04	5.44/7.4	60
7 华北落叶松+3 青海云杉	8/18	2900	16.3	上	N42	400	840/1960	5.42/2.36	5.88/5.36	50
6 白桦+4 青海云杉	20/25	2940	19.3	上	N355	400	2500/2500	8.6/5.25	9.41/6.83	82
青海云杉	32	2860	16.0	中	N285	400	1850	8.2	7.15	75

注:树种前面数字为混交比;\*为东峡林场内选取的立地条件基本一致的天然林对照样地

1.2 试验方法

土样采集:于 2005 年 7 月在标准地内选择具有代表性的地段,挖取 3 个土壤剖面,记录剖面形态特征,每隔 10 cm 用环刀分层取样。

土壤物理性质分析方法<sup>[10]</sup>:利用环刀土样测定土壤总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度;土壤颗粒组成用吸管法。

土壤化学性质分析方法<sup>[11]</sup>:有机质含量用重铬酸钾外加热法;全氮量用凯氏法;碱解氮含量用扩散法;pH 值用酸度计法。

2 结果与分析

2.1 土壤物理环境的变化

2.1.1 土壤孔隙度组成变化 土壤孔隙状况影响

土壤通气性、透水性和林木根系生长,是土壤肥力的重要指标。

从表 2、图 1 - 2 可以看出随着退耕年限变化土壤孔隙的变化情况,0 - 20 cm 总孔隙度、毛管孔隙度和最小持水量随退耕还林年限增长其变化规律基本一致,变化趋势呈不规则的“S”型曲线,即:分别在退耕 5 a 和 20 a 左右达到高点峰值,退耕初期土壤表层生草化过程强烈,土壤有机质积累较快,促使土壤团聚体和微团聚体含量的迅速提高,因而土壤总孔隙度随之增加,与之相适应的土壤毛管孔隙度和最小持水量亦增加;退耕 18 a 左右以后人工林进入稳定生长期,林分结构基本稳定,林分生物量逐渐增多,同时土壤中的有机物亦明显增加,进而增强土壤孔隙状况的进一步改善。

退耕还林后土壤表层最大持水量变化幅度大,但总的趋势为随退耕年限增加毛管持水量变化较小且略有下降;而非毛管孔隙度基本没有变化,亦说明土壤中的大孔隙保持稳定。20 - 40 cm 土层孔隙度和持水量状况随退耕还林年限变化趋势非常一致,大体呈增长趋势,说明随着退耕还林年限的增加,土壤的通气状况和持水能力得到改善和协调,同时亦显示土壤有机质的积累决定了土壤孔隙状况。由此

可见土壤非毛管孔隙度和总孔隙度可以作为土壤物理性质的评价指标。

2.1.2 土壤机械组成变化 土壤机械组成是土壤的一个稳定的自然属性,在很大程度上决定着土壤的性状和用途,且由于成土因素多,造成了土壤机械组成在空间上差异很大,为了阐明退耕还林后区域内土壤特性的空间变异性,需要进行密集采样,以便从微观的角度来描述土壤特性空间变异规律。

表 2 不同退耕年限土壤孔隙组成情况

主要植物	土层	退耕	最大	毛管	最小	总孔	毛管	非毛管	土壤密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )
	厚度/cm	年限/a	持水量/%	持水量/%	持水量/%	孔隙度/%	孔隙度/%	孔隙度/%	
小麦	0 - 20	0	37.83	34.40	32.00	51.85	47.15	4.70	1.37
	20 - 40		46.95	45.21	40.24	61.25	58.98	2.27	1.26
青杨 + 白桦	0 - 20	1	41.61	37.84	35.20	57.04	51.87	5.17	1.31
	20 - 40		51.65	49.73	44.26	67.38	64.88	2.50	1.10
青海云杉 + 中国沙棘	0 - 20	5	43.84	38.20	34.81	51.07	44.50	8.80	1.07
	20 - 40		37.49	32.86	29.77	47.26	41.42	5.83	0.96
华北落叶松	0 - 20	18	37.76	32.91	23.60	37.98	33.09	4.88	1.03
	20 - 40		54.20	44.95	38.34	66.61	62.90	1.91	1.01
青海云杉	0 - 20	32	62.43	56.48	44.00	59.85	54.15	7.60	1.17
	20 - 40		47.50	42.00	37.70	59.30	53.20	3.09	1.11

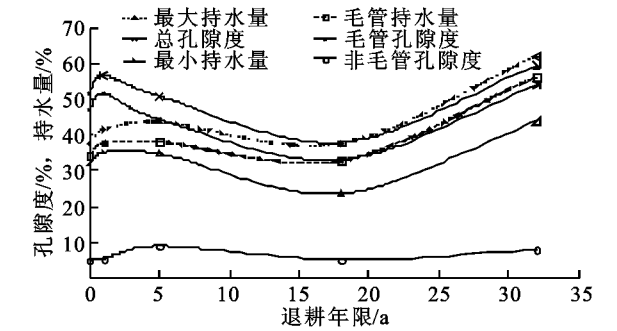


图 1 淋溶棕褐土 0 - 20 cm 孔隙度、持水量含量随退耕年限变化

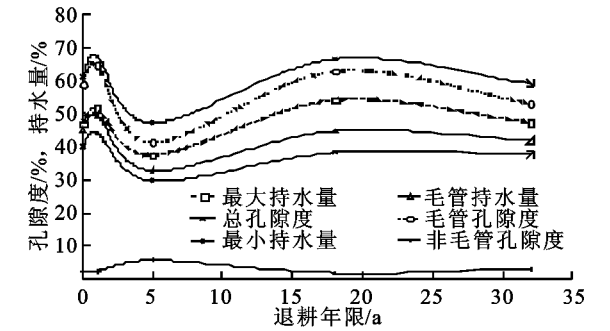


图 2 淋溶棕褐土 20 - 40 cm 孔隙度、持水量含量随退耕年限变化

表 3 不同退耕年限土壤机械组成的变化

主要植物	退耕 年限/a	土层 厚度/cm	土壤粒级/%		
			砂砾 >0.05 mm	粉粒 0.05 ~ 0.01 mm	黏粒 <0.01 mm
小麦	0(农耕地)	0 - 40	19.76 ±1.62	86.89 ±1.36	93.35 ±2.63
青杨 + 白桦	1	0 - 40	28.95 ±0.86	79.11 ±1.83	84.95 ±1.94
青海云杉 + 中国沙棘	5	0 - 40	28.87 ±0.97	84.65 ±1.26	86.47 ±1.27
华北落叶松	18	0 - 40	56.67 ±1.06	72.37 ±1.63	77.96 ±1.72
青海云杉	32(天然林)	0 - 40	26.15 ±0.68	72.99 ±0.94	89.86 ±2.79

从表 3 可以看出,随植被恢复的发展,土壤机械组成发生了变化,1 a、5 a、18 a 不同年限退耕地和 32 a 天然林对照的砂砾含量分别增加了 46.5 %、46.1 %、186.8 %、32.3 %,黏粒含量分别减少了 8.9 %、7.3 %、16.3 %、7.1 %。显然,从农地到退耕地,土壤少了农业那样的精细化耕作后,土壤结构更

加趋向了天然植被条件下的机械组成,砂砾增加黏粒减小,也就增加了土壤的通透性,这样也就加快了水分的入渗,减少了径流的发生,也就减少了水流的侵蚀,减轻了水土流失,同时涵养了水源。不同粒径的土壤颗粒对土壤团粒结构的形成和保水保肥的贡献不同,黏粒的减少将抑制土壤的膨胀、可塑性及离

子交换等物理性质。

2.1.3 土壤密度的变化 土壤密度是土壤最基本的物理性质,与土壤孔隙率高低有关,并影响土壤的保水能力和渗透性能。退耕还林后土壤密度随退耕年限变化,从表 2 和图 3 可以非常直观的看出,在退耕 5 a 后,由于土壤失去了农耕的人为影响后,表现最差,达到最低值,在退耕 20 a 左右可逐步恢复到天然林水平。土壤物理性质不仅取决于土粒大小和种类,还与其团聚和排列有关。土壤密度体现了土壤的紧实度,与土壤的孔隙度、透气性和渗透率成反比。

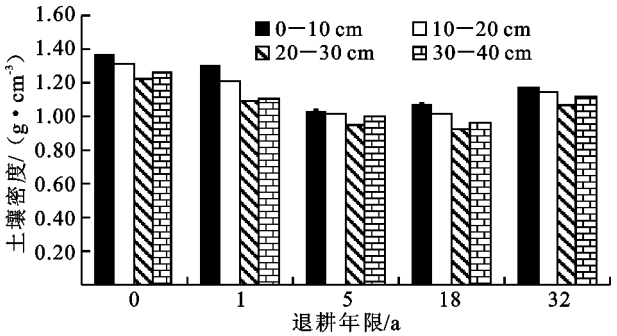


图 3 土壤密度随退耕年限的变化

2.2 土壤化学环境的变化

土壤化学特性及其养分含量是土壤质量最为重

要的表征指标,也是衡量土壤生产潜力的基本内容。在退耕还林过程中,随着退耕年限的变化,土壤养分和化学性质也发生了变化。

2.2.1 土壤有机质、碳含量变化 农耕地在退耕还林过程中,土壤有机质、碳含量呈逐步上升的趋势(表 4)。组间效应检验(表 5)表明,  $F = 20.331$ ,  $P$  (Sig. = 0.006) < 0.01,可以认为土壤有机质与碳含量效应显著。其中,土壤有机质和碳的变幅以从农耕地到退耕 18 a 和 32 a 天然林最大,变化过程为先降后上升的“V”型过程,这表明失去人为干预下土壤养分的一个缓慢变化过程。

2.2.2 土壤有机质、全氮变化 土壤有机质是评价土壤肥力的一项重要指标,与多种土壤养分相关,同时对土壤持水供水能力、孔隙度和团聚度等物理性质有重要影响<sup>[12-13]</sup>。同时土壤有机质还与土壤矿物部分共同作为林木营养的来源,它的存在还会促进土壤微生物的活动、改善土壤的物理性质,并且提高土壤的保肥力和缓冲性。林木的凋落物、死根系、林下植被的枯死物、以及土壤中的小动物、微生物的排泄物、分泌物和残体都是森林土壤有机物质的重要来源,因此,退耕还林能有效地增加土壤有机质的含量,改善土壤理化性质。

表 4 不同退耕年限土壤养分含量变化

主要植物	退耕年限/a	有机质/ %	碳/ %	全氮/ %	C/ N	pH 值
小麦	0(农耕地)	3.03	1.76 ±0.81	0.17 ±0.02	10.47	8.04
青杨+白桦	1	2.49	1.44 ±0.34	0.13 ±0.01	10.77	8.02
青海云杉+中国沙棘	5	2.22	1.29 ±0.72	0.12 ±0.01	10.66	8.01
华北落叶松	18	3.31	1.92 ±0.63	0.20 ±0.03	9.75	5.71
青海云杉	32(天然林)	6.88	3.99 ±1.02	0.27 ±0.03	14.72	7.03

表 5 组间效应检验

Dependent Variable : 有机质						
Source	Type	III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Intercept	Hypothesis	66.389	1	66.389	20.331	0.006
	Error	16.327	5	3.265 (a)		
碳	Hypothesis	16.327	5	3.265		
	Error	0.000	0	(b)		

a:MS(碳);b:MS(Error)

从表 6 可以看出,退耕还林后随着恢复过程的演替,林地有机质总体呈上升趋势,由退耕时平均含量的 28.64 g/kg 上升到退耕 32 a 天然林的 130.28 g/kg,30 a 中增加了 4.5 倍。图 4 与图 5 表明,褐土有机质、全氮含量随退耕还林年限变化呈稳定积累状态,体现了淋溶性土壤养分积累的特征。0~5 a 表层(0-20 cm)含量略有降低,可能与农田施肥中氮素或有机物残留有关。5~20 a 随着林龄的增加,林地郁闭度逐渐增大,林地枯落物返还土壤有机物

亦增加,有机质呈先稳步后加速增长趋势(图 6)。20 a 后部分林分出现自疏现象,凋落物分解又加快,但可能由于凋落物的分解对有机质的补充不能补偿矿化作用和植物生长吸收的消耗,故土壤的有机质下降还在进行。土壤全 N、碱解 N 与土壤有机质含量呈极显著正相关,土壤全 N、碱解 N 的变化趋势与有机质变化趋势一致(图 4、图 5)。由于土壤有机质和氮素均来源于凋落物,故受到凋落物分解率的影响。

土壤中全氮含量代表能提供给植物所需氮的最大潜力。随着退耕还林年限的增加,土壤中氮元素的含量逐步趋向了天然林地的水平,土壤中氮的含量也呈“V”型变化。不同年限退耕地间土壤氮含量的差异性要大于碳含量的差异性,这表明土壤在恢复过程中土壤氮的增加速率要快于碳。

2.2.3 土壤 C/N 土壤中有机质的 C/N 比是一个重要的指标<sup>[12-14]</sup>,若 C/N 比很大则在其矿化作用的最初阶段就不可能对植物产生供氮的效果,因为微生物的同化量会超过矿化作用所提供的有效碳量,有可能使植物缺氮现象更为严重。但若 C/N 比很小则在其矿化作用一开始就能供应植物所需的有效氮量。因此 C/N 对植物的生长发育有着至关重要的作用。表 4 显示不同退耕年限条件下土壤 C/N 的变化呈减小趋势,表明在退耕还林地上土壤氮元素的供应是充足的。

表 6 不同退耕年限土壤有机质、全氮的变化

主要植物	退耕年限/ a	土层/ cm	有机 质/%	全氮/ %
小麦	0(农耕地)	0-20	2.86	0.16
青杨+白桦	1	0-20	2.25	0.15
青海云杉+中国沙棘	5	0-20	4.03	0.21
华北落叶松	18	0-20	7.14	0.42
青海云杉	32(天然林)	0-20	12.18	0.48
小麦	0(农耕地)	20-40	2.16	0.15
青杨+白桦	1	20-40	2.46	0.14
青海云杉+中国沙棘	5	20-40	1.55	0.09
华北落叶松	18	20-40	2.38	0.14
青海云杉	32(天然林)	20-40	7.31	0.27
小麦	0(农耕地)	40-60	4.08	0.19
青杨+白桦	1	40-60	2.76	0.11
青海云杉+中国沙棘	5	40-60	1.09	0.06
华北落叶松	18	40-60	0.41	0.03
青海云杉	32(天然林)	40-60	1.15	0.06

2.3 土壤各因子间的相互作用

2.3.1 土壤密度与土壤全氮、碳及黏粒含量的相关性 由表 7 的 Pearson 相关系数可知,土壤的全氮、碳含量均与土壤密度呈负相关关系,与黏粒的含量呈正相关,即土壤密度总体上随着土壤全氮、碳含量的减少而增加的,细颗粒物多,有机质含量高,土壤密度就小,从而有助于提高土壤的稳定性。尤为重要的是,三个因素同时与 20-40 cm 的土壤密度极显著正相关,表明土壤重要的理化性质在第二层表现更为明显。说明该区域土地在退耕还林过程中,当各种外应力造成对地表的侵蚀时,如果影响范围只涉及地表浅层部分,那么对土壤的理化性质还不

会造成太大的损伤,但是如果侵蚀强度加大,那么就很可能使土壤的理化性质发生本质上的改变,致使受损的土壤难以恢复。

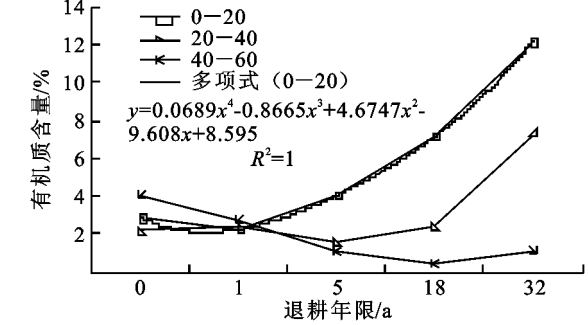


图 4 土壤有机质含量随退耕年限的变化

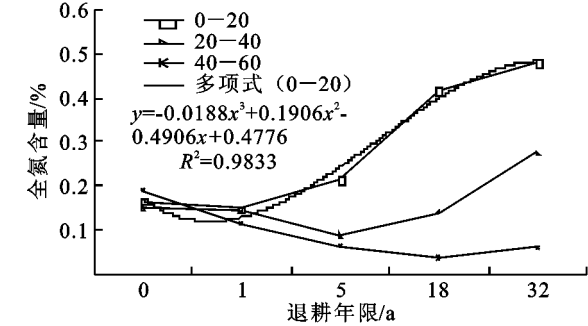


图 5 土壤全 N 含量随退耕年限的变化

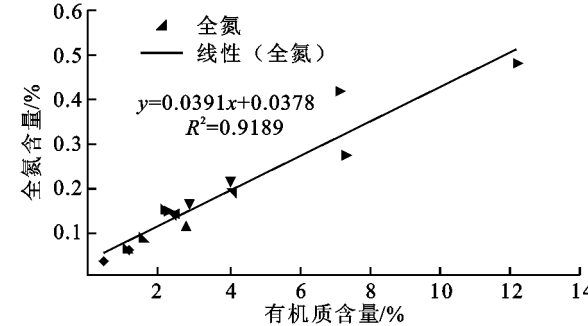


图 6 土壤全氮与有机质含量关系

表 7 土壤密度与其它三因素的相关分析

土壤密度	因素	Pearson 相关系数	P
0-20 cm	全氮	-0.285	0.584
	碳	-0.202	0.702
	黏粒	0.612	0.196
20-40 cm	全氮	0.753 **	0.002
	碳	0.664 **	0.002
	黏粒	0.838 **	0.001

\* \*表示显著水平为 0.01 时,相关极显著,下同。

2.3.2 土壤黏粒、全氮和碳含量的相关性 土壤的颗粒组成状况与土壤营养元素之间存在密切关系。一般情况下,土壤团粒结构增加,质地细密有利于营养元素的吸收与贮存;反过来,营养元素的增加,又有利于土壤团粒结构的形成。从表 8 的 Pear-

son 相关系数可知,土壤黏粒、全氮及碳含量三因素之间显著正相关。而且黏粒与全氮含量之间的相关系数分别大于黏粒与碳和全氮与碳含量之间的相关系数。可见三者虽然有着同增减性,但是黏粒与氮的关系密切度要高于碳、氮之间的关系。因此,土壤中颗粒物的减少导致氮素的衰减十分明显,从而导致土壤稳定性降低。

表 8 因素间(土壤黏粒、全氮和碳含量)的相关分析

因素	比较因素	Pearson 相关系数	P
黏粒	全氮	0.964 **	0.001
	碳	0.629 **	0.002
全氮	碳	0.642 **	0.001

表 8 结果表明,随着退耕还林年限的增加,土壤环境会发生明显的改变。表现出土壤黏粒含量增多,砂砾含量减少,土壤密度呈下降趋势,进而引起土壤有机质、碳、氮含量和土壤持水能力增加。这种土壤颗粒组成与营养元素及水分之间的同增同减性表明土壤恢复过程中,不仅使土壤细化,还会使土壤肥力和土壤稳定性进一步增加。

3 结论与讨论

(1)淋溶棕褐土表层(0 - 20 cm)总孔隙度、毛管孔隙度和最小持水量随退耕还林年限增长其变化规律基本一致,变化趋势呈不规则的“S”型曲线;土壤有机质和碳的变幅以从农耕地到退耕 18 a 和 32 a 天然林年最大,变化过程为先降后升的“V”型过程,土壤 C/N 的变化呈减小趋势,表明在退耕还林地上土壤氮元素的供应是充足的。

(2)土壤的全氮、碳含量均与土壤密度呈负相关关系,与黏粒的含量正相关,而三个因素同时与 20 - 40 cm 的土壤密度极显著正相关,表明了土壤的理化性质在第二层表现更为明显,当各种外应力造成对地表的侵蚀时,如果影响范围只涉及地表浅层部分,那么对土壤的损伤还较小,但是如果侵蚀强度加大,那么就很可能使土壤的理化性质发生本质上的该变,致使受损的土壤难以恢复。土壤黏粒、全氮及碳含量三因素之间显著正相关,而且黏粒与全氮含量之间的相关系数分别大于黏粒与碳和全氮与碳含量之间的相关系数。因此,土壤中颗粒物的减少会导致氮素的衰减十分明显,从而导致土壤稳定性降低。

(3)随着退耕还林年限的增加,土壤环境会发生明显的改变。表现出土壤黏粒含量增多,砂砾含量减少,土壤密度呈下降趋势,进而引起土壤有机质、碳、氮含量和土壤持水能力增加。这种土壤颗粒组成与营养元素及水分之间的同增同减性表明土壤恢复过程中,不仅使土壤细化,还会使土壤肥力和土壤稳定性进一步增加。20 a 左右的人工林土壤理化性状基本达到了 30 a 左右天然林的水平,表明经过适度的人类干扰后可以缩短自然演替过程,有利于生态系统的恢复。

参考文献:

[1] 赵其国. 21 世纪土壤科学的展望[J]. 地球科学进展, 2001, 16(5): 704-709.

[2] 骆永明,滕应,过园. 土壤修复——新兴的土壤科学分支学科[J]. 土壤, 2005, 37(3): 231-235.

[3] 赵其国. 土壤圈在全球变化中的意义与研究内容[J]地学前沿, 1997, 4(2): 153-162.

[4] 赵其国, 骆永明. 开展我国东南沿海经济快速发展地区资源与环境质量问题研究建议[J]. 土壤, 2000, 32(4): 169-172, 187.

[5] 赵其国. 土壤圈及其在全球变化中的作用[J]. 土壤, 1994, 26(1): 4-7.

[6] 赵其国. 中国土壤科学发展的理论与实践[J]. 生态环境, 2004, 13(1): 1-5.

[7] 彭少麟. 南亚热带退化生态系统恢复和重建的生态学理论和应用[J]. 热带亚热带植物学报, 1996, 4(3): 36-44.

[8] 丁运华. 关于生态恢复几个问题的讨论[J]. 中国沙漠, 2000, 20(3): 341-344.

[9] 周进生, 石森. 矿区生态恢复理论综述[J]. 中国矿业, 2004, 13(3): 10-12.

[10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.

[11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.

[12] 李菊梅, 王朝辉, 李生秀. 有机质、全氮和可矿化氮在反映土壤供氮能力方面的意义[J]. 土壤学报, 2003, 40(2): 232-237.

[13] 赵哈林, 赵学勇, 张铜会, 等. 沙漠化过程中植物的适应对策及植被稳定性机理[M]. 北京: 海洋出版社, 2004.

[14] Eiland F, Gahonia T S. Biologically associated C and N in relation to number of bacteria and ATP content in the rhizosphere, Trans[J]. 15th World Congr Soil Sci, 1994, 4: 50-51.