

西藏中部退化土壤在不同培肥措施下的肥力特征

蔡晓布¹, 张永青¹, 钱 成³, 陈芝兰², 熊 伟¹, 薛会英¹, 普 穷¹

(1. 西藏农牧学院农学系, 林芝 860000; 2. 西藏农牧学院生物测试中心, 林芝 860000; 3. 西藏农牧学院水电系, 林芝 860000)

摘要:于西藏中部春播条件下就不同培肥方式对退化土壤物理、化学和生物性质的影响以及土壤肥力因子间的相互关系进行了研究。结果表明, 化肥、有机肥, 特别是有机-无机肥配合施用能协调土壤环境, 促进以细菌为主导的土壤微生物繁殖以及土壤有机质、土壤团聚结构形成和土壤养分转化等方面具有重要作用; 退化土壤物理、化学和生物性质呈现出变化特征的相对一致性, 并在总体上呈现出较为明显的恢复态势, 突出地反映了高原高寒以及干旱、半干旱条件下退化土壤所具有的在相对较短的时间内实现肥力恢复及结构重建的可能性及其潜力。石灰性土壤条件下, 耕层土壤有机质以及不同土层全氮、有效氮、全磷、有效磷的绝对增长量较大。同时, 不同培肥方式对不同土层土壤真菌、固氮菌以及耕层土壤放线菌的繁殖普遍具有不同程度的抑制作用; 不同土层土壤固氮菌与纤维素分解菌均呈负相关。

关键词:退化土壤; 土壤剖面; 培肥方式; 肥力特征; 西藏

Effects of different fertilizing manners on the fertility characteristics of the degraded soil in central Tibet

CAI Xiao-Bu¹, ZHANG Yong-Qing¹, QIAN Cheng³, CHEN Zhi-Lan², XIONG Wei¹, XUE Hui-Ying¹, PU Qiong¹ (1. Department of Agriculture, Tibet Agricultural and Animal Husbandry College, Linzhi 860000, China; 2. Microbial laboratory, Tibet Agricultural and Animal Husbandry College, Linzhi 860000, China; 3. Department of Water and Electricity, Tibet Agricultural and Animal Husbandry College, Linzhi 860000, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(1): 75~83.

Abstract: A spring-wheat field trial (2001~2002) was carried out to investigate the effects of different organic or inorganic fertilizer applying manner on the physical, chemical or biological characteristics of the degraded soil and the interactions among the soil fertility factors in central Tibet. A 4×4 split-plot design was employed. Organic fertilizer (sheep manure containing 7 g/kg N, 4.9 g/kg P₂O₅, 2.8 g/kg K₂O and 267g/kg O.M respectively) was the main treatment which included four (0, 7.50, 26.25, 45.00 t/(hm²·a) levels. At each main treatment, four subtreatments, N₀P₀K₀ (0-0-0 kg/(hm²·a) as N-P₂O₅-K₂O), N₁P₁K₁ (60-24-12 kg/(hm²·a), N₂P₂K₂ (120-48-18 kg/(hm²·a) and N₃P₃K₃ (180-72-24 kg/(hm²·a), were set using urea, calcium superphosphate and potassium sulphate as fertilizers. The results were shown that the applying of inorganic or organic fertilizers enhanced the formation of soil aggregates, particularly, the larger aggregates, while bulk density and porosity of soil were not affected. Comparing with non-fertilized treatment soil organic matter was increased by fertilization by 85.6% in plough layer, but decreased by 10% in 31~60 cm layer. In calcareous soil, all fertilization treatments had higher available P but lower total N and available K in the soil of plough layer, the available P level was as high as 21.74 mg/kg in average while the total N and available K were only 0.177 g/kg and 45.57 mg/kg respectively. The organic matter content in plough layer or the content of total N, available N, total P, available P in different depth of soil profile showed higher net increasing by fertilizations. Propagation of fungi and N fixing bacteria in the layers of 2~30, 31~60 cm and of actinomycetes in 2~30 layer cm soil layer were suppressed by fertilization. Bacteria was dominant group in biome of the soil microbe community in all layers of the soil profile. Nitrogen-fixing bacteria reduced by the increase of the cellulose-decomposing bacterium in different horizon.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40061004)

收稿日期:2002-12-29; **修订日期:**2003-09-24

作者简介:蔡晓布(1962~),男,汉族,河南省开封市人,副教授,从事土壤生态与植物营养研究工作。E-mail:caixb@sohu.com; cxb@taahc.org

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 40061004)

Received date: 2002-12-29; **Accepted date:** 2003-09-24

Biography: CAI Xiao-Bu, Associate professor, research interest in soil and plantation nutrition. E-mail: caixb@sohu.com

Fertilization increased the proportion of bacteria in soil, the increment in deep layer was higher than that in plough layer. Applying of inorganic fertilizer increased the organic matter by 62.0%, soil total N by 300.0%, total P by 74.0%, available N by 73.5% and available P by 217.0% respectively; soil bacteria amount was increased by 57.5% in average. The effects of fertilization on crop yield showed similar trend as on soil fertility. It is concluded that the recovering of soil fertility would take long term without fertilization in central Tibet. All different fertilizing manners had significant and prompt effectiveness on the coordinating of soil environment, on promoting the process of bacteria-dominating propagation of soil microorganism, on enhancing the accumulation of soil organic matter and the reconstruction of soil structure, and on increasing the pool of N and P comparing with non-fertilization. The changing of physical, chemical or biological characteristics of the degraded soil showed similar ways among the different fertilizations. Soil fertility showed a significant recovering trend after applying of fertilizers, which demonstrated the possibility and potential of recovery of soil fertility and reconstructing of soil structure in relative short period.

Key words: degraded soil; soil profile; characteristics soil fertility; manner of soil fertility improving; Tibet

文章编号: 1000-0933(2004)01-0075-09 **中图分类号:** S154.1, S181 **文献标识码:** A

在自然过程与人为过程的彼此作用、相互激发下,西藏中部农田土壤已呈日趋严重的退化态势,因此,探明土壤肥力变化过程,实现土壤肥力的恢复与重建,是充分发挥种植业潜力的关键所在。近年,土壤物理、化学和生物学过程及其相互作用是国际上关于土壤退化研究的热点^[1~3]。我国学者在土壤退化过程和机理、退化过程模拟与预测等研究方面亦取得了进展,但研究着重于从退化土壤耕层的某些土壤物理、化学特性描述土壤退化特征^[3~8],有关退化土壤生物特性的研究相对较少^[2~5, 9, 10],土壤退化过程各因子的相互作用研究亦较缺乏^[2, 3]。同时,鉴于土壤生态系统的复杂性,国内外在土壤肥力演化指标的选择方面亦未能形成统一标准^[10, 11]。本研究以土壤容重、孔隙度、土壤团聚体、土壤有机质、土壤养分、土壤微生物区系及其主要生理类群等作为退化土壤肥力演化指标,这对探明西藏高原土壤退化过程,恢复和重建退化土壤肥力具有重要的理论意义。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于海拔 3649m 的拉萨河下游谷地,其年平均气温 7.5℃,无霜期 136d,多年平均降水量、蒸发量分别为 444.8mm 和 2205.6mm,干季(10~5月份)分别占 5%和 70%;年大风(>17m/s)日数 32.3d。春播作物一般占总播种面积的 70%以上,农田土壤养分投入量远低于全国平均水平。由于为一年一熟制,农田土壤年裸露期长,且与干季、风季同期。因此,土壤风蚀、水蚀导致以沙化、结构恶化和贫瘠化为主的土壤退化过程。供试土壤为退化严重的砂壤质石灰性耕种潮土,试前不同土层养分含量见表 1。

表 1 供试土壤剖面养分特征

Table 1 Chemical properties of the soil profile tested

土壤剖面 Profile (cm)	全氮 Total N N(g/kg)	全磷 Total P P ₂ O ₅ (g/kg)	全钾 Total K K ₂ O(g/kg)	碱解氮 Avail. N N(mg/kg)	有效磷 Avail. P P ₂ O ₅ (mg/kg)	有效钾 Avail. K K ₂ O(mg/kg)	有机质 O. M (g/kg)	CaCO ₃ (g/kg)	pH
0~30	0.049	0.514	3.105	27.025	5.714	34.156	12.18	16.56	7.35
31~60	0.103	0.277	3.316	41.800	7.044	37.623	15.10	17.40	7.42
61~100	0.188	0.907	3.434	49.625	6.812	42.740	11.47	19.31	7.57

1.2 试验设计及采样、测定方法

试验于 2001 年、2002 年 4 月中旬~8 月中旬春播(春小麦,管理同当地大田)条件下定点(定位)进行,采用 4×4 裂区随机设计,3 次重复,小区面积 21m²。以有机肥(新鲜羊粪,含 N、P₂O₅、K₂O、有机质分别为 6.7、4.9、2.8 和 267g/kg)为主区(M),M₀、M₁、M₂、M₃ 主区羊粪年投入量分别为 0、7.50、26.25、45.00t/hm²;化肥为副区(F),氮、磷、钾分别为尿素、过磷酸钙、硫酸钾,用量以 N-P₂O₅-K₂O 计。其中, F₀、F₁、F₂、F₃ 分别为 N₀P₀K₀(0-0-0 kg/hm²·a)、N₁P₁K₁(60-24-12 kg/(hm²·a)、N₂P₂K₂(120-48-18 kg/(hm²·a)、N₃P₃K₃(180-72-24 kg/(hm²·a)。有机肥、化肥均作基肥施入耕层。2001 年 4 月 10 日在供试土壤于基肥投入前按 0~30、31~60、61~100cm 土层分别随机采取 13 个土样组成 3 个土壤混合样品,各土层基础养分含量均为每一混合土样的 3 次测定平均值;2002 年 8 月 17 日在第二茬春小麦测产后,即于各小区随机选取 6 个样点,按 0~30、31~60、61~100cm 土层采集土样,并分别组成混合样品(微生物测定土样自 2cm 土层起采集),各处理土壤物理、化学和生物学指标测定结果均为 3 重复的同一混合土样平均值;各处理作物产量系 2002 年小区实际测产平均值。

土壤有机质、全氮、全磷、全钾测定分别采用重铬酸钾容量法-外加加热法、半微量开氏法、NaOH 熔融-钼锑抗比色法和 NaOH 熔融-火焰光度法,土壤有效氮、磷、钾测定分别采用直接蒸馏法、0.5mol/L NaHCO₃ 法和冷的 2mol/L HNO₃ 溶液浸提-火焰光度法,土壤 pH 值、CaCO₃ 分别采用电位测定法和中和滴定法;土壤团粒结构采用机械筛分法;土壤微生物测定均采用 23℃ 恒温培养,稀释倾注平板法分离,平板涂布法计数,镜检鉴定类别,全程无菌操作。其中,细菌、真菌、放线菌测定分别采用牛肉膏蛋白胨培养基、马丁氏培养基+1%链霉素、改良高氏 1 号培养基+3%重铬酸钾,固氮菌、纤维素分解菌分别采用阿须贝无氮培养基和郝奇逊培养基。

2 结果与分析

2.1 土壤物理性质的变化特征

土壤团聚体是植物正常生长、发育的结构基础^[12]。结果表明,西藏高原高寒、低温条件下,不同培肥方式对土壤团聚体,特别是较大粒径团粒的形成具有较为显著的促进作用,对土壤容重、土壤孔度的影响则相对较低。表 2 可见,不同培肥方式 0~30cm 土层 >0.25mm 的水稳性团粒较 CK 增加 5.6%~43.8%,平均增幅达 38.8%;各主区内、各主区间、不同主区同一化肥组合间,>0.25mm 的土壤团聚体基本呈随化肥或有机肥递增而渐趋提高的趋势。一般认为,干旱、半干旱地区土壤团粒以 0.5~3mm 最为适宜,而 >2mm 的土壤团粒愈多,则土壤抗蚀性能愈强^[13]。各处理 0.5~3mm 土壤团粒较 CK 增加 34.4%~146.2%,平均增幅达 108.1%。M₀~M₃ 主区,0.5~3mm 土壤团粒亦基本随化肥递增而增加,其 2~3mm 土壤团粒亦呈 M₃>M₂>M₁>M₀ 主区。但是,各处理 <0.25mm 的土壤微团聚体数量均低于 CK,且均无 >3mm 的较大粒径团粒。不同培肥方式下的土壤容重、孔度变化较小,各处理平均土壤孔度、土壤容重分别较 CK 增、减 9.9%和 4.1%。单施化肥时,随化肥递增,土壤孔度、土壤容重则分别趋于提高和下降,各有有机肥主区内亦基本呈同一趋势。上述结果不但反映了有机肥在短期内对土壤团聚体形成的重要影响,而且突出体现了化肥在协调与改善土壤微生物营养环境,促进并激发有机物料和土壤有机残体分解,并最终形成土壤有机质方面的重要作用。

表 2 土壤物理性质的变化特征

Table 2 Soil physical fertility evolution feature of different application methods

处理 Treatment	0~30cm 土壤团聚体(mm) Waterstable aggregate					0~100cm 土壤容重 Bulk density			0~100cm 土壤孔度 Porosity			0~60cm 含水量 Moisture content	
	3.0~2.0	2.0~1.0	1.0~0.5	0.5~0.25	<0.25	0~30	31~60	61~100	0~30	31~60	61~100	0~30	31~60
	(%)					(g/cm ³)			(%)			(%)	
CK	0.8	4.2	13.6	25.7	55.7	1.32	1.40	1.53	47.3	41.4	36.3	16.7	15.8
M ₀ N ₁ P ₁ K ₁	3.7	7.3	14.0	21.8	53.2	1.31			50.3			16.3	15.3
M ₀ N ₂ P ₂ K ₂	3.5	11.4	16.4	20.2	48.5	1.28			50.7			16.9	15.3
M ₀ N ₃ P ₃ K ₃	7.7	10.3	16.0	21.6	44.4	1.28	1.34	1.53	51.4	45.7	36.5	17.3	15.9
M ₁ N ₀ P ₀ K ₀	6.4	16.1	17.8	18.8	40.9	1.28			51.6			17.2	16.5
M ₁ N ₁ P ₁ K ₁	8.2	15.3	17.5	17.7	41.3	1.27			51.6			16.8	16.3
M ₁ N ₂ P ₂ K ₂	7.1	16.0	16.7	20.7	39.5	1.27			51.8			17.0	15.8
M ₁ N ₃ P ₃ K ₃	7.4	17.2	17.6	19.0	38.8	1.26	1.32	1.54	52.1	46.3	35.7	15.7	15.0
M ₂ N ₀ P ₀ K ₀	7.4	16.5	18.8	17.8	39.5	1.25			52.0			17.8	17.2
M ₂ N ₁ P ₁ K ₁	6.9	10.6	15.0	23.7	43.8	1.28			51.4			17.4	15.9
M ₂ N ₂ P ₂ K ₂	8.3	12.5	17.4	21.4	40.4	1.27			51.7			18.7	16.9
M ₂ N ₃ P ₃ K ₃	9.8	14.1	17.7	19.2	39.2	1.26	1.33	1.53	52.7	46.8	36.0	16.9	16.8
M ₃ N ₀ P ₀ K ₀	7.5	15.2	16.3	21.6	41.4	1.26			52.3			16.8	16.0
M ₃ N ₁ P ₁ K ₁	10.1	15.4	19.6	18.6	36.3	1.22			53.7			19.1	16.0
M ₃ N ₂ P ₂ K ₂	8.2	14.9	18.5	19.2	39.2	1.25			53.0			18.3	16.8
M ₃ N ₃ P ₃ K ₃	11.8	14.2	19.8	17.0	37.2	1.22	1.30	1.53	54.6	46.5	36.3	18.5	17.6

2.2 土壤化学性质的变化特征

2.2.1 土壤有机质 土壤有机质对土壤物理、化学和生物学过程有着极为深刻的影响。试验条件下,不同培肥方式耕层土壤有机质含量的提高具有迅速、显著的重要特征。图 1 可见,CK 各土层较试前无明显变化,其耕层有机质含量仍明显低于 31~60cm 土层;各被测处理 61~100cm 土层与 CK 则无明显差异,呈相对稳定的状态;由于施肥对根系吸收土壤深层养分的促进作用,各处理 31~60cm 土层有机质含量普遍低于 CK,平均降幅为 10.0%。一般认为^[14],旱地土壤及质地较为轻粗的土壤,耕层、犁底层有机质含量差异较小。本试验中,各施肥处理耕层土壤有机质含量不仅均显著高于 CK(平均增幅达 85.6%),且远高于 31~60cm 土层,体现了耕层土壤有机质相对较高的积累速率,这与其在土壤中的变化只有经较长时间才能显现出来的有关研究结论不同^[14,15]。其原因主要在于:(1)不同肥源对土壤营养环境的调节与改善,促进了土壤微生物的生长与繁殖,从而加速了土壤

有机残体的分解和腐殖质的形成。在供试土壤极低的有机质含量条件下,不同肥源对土壤有机质形成的直接和间接作用将更有助于其积累速率的提高^[14]。(2)土壤质地、游离碳酸钙等对土壤有机质的形成与积累亦有影响。如Ishizuka、沈善敏等的研究表明^[14],土壤粘粒对土壤有机残体的分解具显著的抑制作用。由于供试土壤为砂壤质,因此土壤粘粒对土壤有机残体分解的保护作用相对较低,有利于其分解速率的提高。同时,供试土壤中大量游离碳酸钙的存在,不仅改变了土壤结构状况,亦掩盖了土壤粘粒抑制有机残体分解速率的作用,有利于植物残体的分解和转化。但亦有研究认为,石灰性土壤的游离碳酸钙并不利于有机质的形成和积累^[14]。

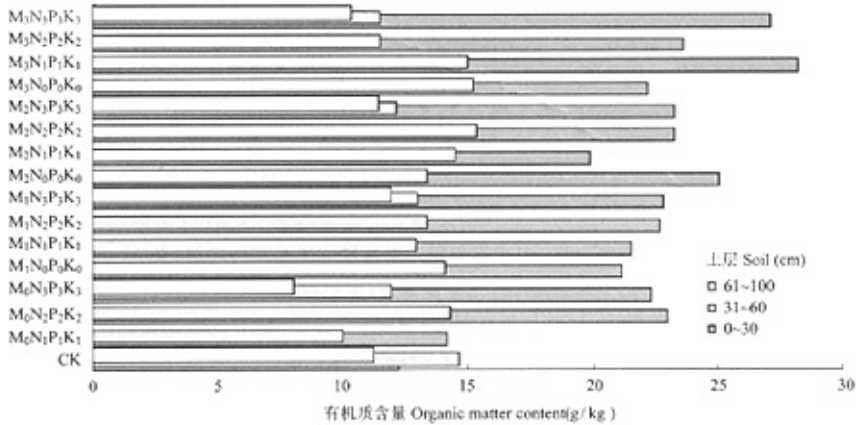


图1 不同培肥方式0~100 cm土层有机质含量(g/kg)

Fig. 1 Profile distribution feature of organic matter in different treatment

2.2.2 土壤养分 表3所示,0~100cm土层,CK全氮、磷、钾与试前无明显差异,且均随土层加深而提高;61~100cm土层,被测试各处理全氮、磷、钾则普遍低于CK;各施肥处理31~60cm土层,特别是耕层土壤全氮、全磷增幅显著,全钾变化则不甚明显。其中,耕层土壤全量养分增幅表现为全氮>全磷>全钾,0~60cm土层则表现为全磷>全氮>全钾。土壤全氮量及其剖面分布是评价土壤氮素肥力的重要指标之一^[16]。M₀主区,土壤全氮不仅主要集中于31~60cm土层,且显著高于该土层各有机肥主区。非但如此,M₀主区0~30cm土层全氮平均量较M₁主区亦呈明显提高;与CK相比,单施化肥各处理耕层土壤全氮量亦分别提高2~5倍,这与氮肥对土壤矿化过程无明显净激发,因而在提高土壤全氮中的作用不甚明显的有关研究结果不尽一致^[15~16]。梁国庆等在石灰性潮土上的长期试验表明^[15],化肥、有机肥配合施用可显著提高耕层土壤全氮含量,且随有机肥用量的增加,下层土壤全氮含量的增幅亦愈大。本试验中,M₁、M₂、M₃主区耕层全氮量较31~60cm土层分别提高17.5%、19.1%和44.0%,其土层差异则随有机肥递增而迅速增大。

土体全磷量自下而上渐趋增加,生物过程积累的土壤磷主要以有机态存在^[17]。表4可见,0~30cm土层有机质与全磷呈极显著正相关,31~60cm土层则呈一定程度的负相关;而0~30、31~60cm土层有机质与全钾的正相关,则与此前西藏高原的有关研究完全不同^[17]。

不同培肥方式对31~60cm土层,特别是0~30cm土层有效氮、磷含量的提高均具显著效应,并在不同土层中呈现出与全氮、磷完全不同的变化特征,即耕层土壤有效磷增幅远高于有效氮,31~60cm土层则呈相反趋势;各土层有效钾增幅仅略高于全钾。表1.5可见,CK各土层有效养分含量较试前普遍呈下降趋势;各施肥处理0~30cm土层有效氮、磷、钾平均量分别较CK增加136.0%、301.4%和37.3%,31~60cm土层分别提高72.8%、48.1%和0.9%。这不但取决于不同培肥方式对耕层土壤养分的直接或间接影响,亦与土壤质地、土壤pH、阳离子交换量等因素的影响有关^[16]。供试土壤质地轻粗,土壤代换量低,有效养分的自然淋失过程较为强烈,加之供试土壤具有显著促进土壤硝化率的pH基础^[18],从而为硝化作用以及硝态氮淋失提供了有利条件。一般情况下,磷淋失量较低,但在砂质土壤中的淋失量可达其施用量的80%^[19]。31~60cm土层有效磷含量的较大幅度提高即可能与供试土壤pH条件下土壤磷素固定量相对最低^[14、18],以及砂壤质土壤有关。石灰性土壤中有磷的固定是其含量远低于最适值的关键因素^[18]。本试验中,尽管各土层有效磷与pH均呈负相关,但各处理0~30cm土层有效磷含量仍远高于石灰性土壤的高量(>10 mg/kg)标准^[20],31~60cm土层亦达中量水平,这可能在于试验条件下分泌磷酸酶的土壤微生物数量较多或生物活性较高对有机磷矿化所产生的促进作用^[21]。31~60cm土层有效钾含量与CK的微弱差异,则与0~30cm土层pH条件下以Ca²⁺、Mg²⁺为主的陪补离子对土壤钾素固定的促进作用,以及土壤有机胶体对交换态钾固持量的增加所导致的钾素

淋失量的下降有关^[14, 18]。大量研究表明^[14, 18],以交换态钾为主体的土壤速效钾含量主要决定于阳离子交换量,尽管砂质土无机胶体含量低,但由于有机质对阳离子交换量的显著贡献,从而对交换态钾具有重要的固持能力,这亦是试验条件下 0~30cm 土层有机质与速效钾显著相关的关键因素(表 4)。

表 3 退化土壤 0~100cm 土层全量养分变化特征(g/kg)

Table 3 Profile distribution feature of total nutrient in different treatment

处理 Treatment	N			P ₂ O ₅			K ₂ O			pH		
	土层 Horizon(cm)			土层 Horizon(cm)			土层 Horizon(cm)			土层 Horizon(cm)		
	0~30	31~60	61~100	0~30	31~60	61~100	0~30	31~60	61~100	0~30	31~60	61~100
CK	0.05	0.10	0.22	0.49	0.28	0.98	3.02	3.31	3.43	7.20	7.48	7.51
M ₀ N ₁ P ₁ K ₁	0.10	0.09		0.77	0.88		3.65	3.28		7.46	7.48	
M ₀ N ₂ P ₂ K ₂	0.25	0.37		0.81	0.88		2.99	3.31		7.42	7.27	
M ₀ N ₃ P ₃ K ₃	0.25	0.18	0.11	0.98	0.86	0.87	3.21	3.01	3.28	7.42	7.47	7.46
M ₁ N ₀ P ₀ K ₀	0.15	0.16		0.92	0.79		3.66	3.32		7.46	7.45	
M ₁ N ₁ P ₁ K ₁	0.10	0.06		0.98	0.84		3.38	3.65		7.48	7.58	
M ₁ N ₂ P ₂ K ₂	0.16	0.08		0.97	0.87		3.22	3.55		7.38	7.44	
M ₁ N ₃ P ₃ K ₃	0.13	0.15	0.11	1.10	0.74	0.74	3.27	3.50	3.64	7.24	7.38	7.46
M ₂ N ₀ P ₀ K ₀	0.29	0.16		1.04	0.93		3.19	3.01		7.02	7.62	
M ₂ N ₁ P ₁ K ₁	0.09	0.15		0.83	0.84		3.45	3.14		7.42	7.44	
M ₂ N ₂ P ₂ K ₂	0.24	0.15		0.99	0.87		3.75	3.12		7.46	7.48	
M ₂ N ₃ P ₃ K ₃	0.16	0.19	0.13	1.07	0.89	0.95	3.07	3.38	3.16	7.24	7.44	7.52
M ₃ N ₀ P ₀ K ₀	0.24	0.15		1.06	1.18		3.12	3.41		7.43	7.44	
M ₃ N ₁ P ₁ K ₁	0.18	0.11		1.22	1.09		3.22	3.45		7.42	7.48	
M ₃ N ₂ P ₂ K ₂	0.16	0.11		0.99	1.18		3.18	3.20		7.40	7.40	
M ₃ N ₃ P ₃ K ₃	0.16	0.14	0.12	1.14	1.04	1.04	3.29	3.19	3.13	7.23	7.49	7.48

表 4 不同土壤肥力因子间的相关性(r)

Table 4 Interrelation of soil fertility factors in different horizon

项目 Item	土层(cm)Horizon	全氮 Total N	速效氮 Avail. N	全磷 Total P	速效磷 Avail. P	全钾 Total K	速效钾 Avail. K
有机质 Organic matter	0~30	0.2530	0.3240	0.8618**	0.5014*	0.2798	0.5848*
	31~60	0.4889	0.4174	-0.1645	0.3771	0.0916	0.2954
pH	0~30	-0.1220	0.1733	-0.0437	-0.1159	-0.5180*	-0.2801
	31~60	-0.3527	-0.2387	-0.0770	-0.0348	0.3387	0.1754

表 5 所示,各有机肥主区不同处理 31~60cm 土层有效养分含量普遍低于 M₀ 主区。值得指出的是, M₁N₀P₀K₀、M₂N₀P₀K₀、M₃N₀P₀K₀ 处理的土壤有效养分,特别是土壤有效氮呈现出与单施化肥相同的变化趋势,0~30、31~60cm 土层有效氮随有机肥递增分呈明显的下降、上升趋势,且 0~30cm 土层有效氮含量均低于 31~60cm 土层;不同土层有效磷、钾的变化亦大体一致。由于所用有机肥 C/N 比(23.1)较为适宜,随有机肥递增,有利于微生物矿化速率和矿化量的提高,在耕层作物根系吸收增加的同时,亦有较多有效养分淋失至土体下层并渐趋积累是产生这种土体差异的重要原因,这与单施有机肥各处理土壤团聚体、有机质、全量养分以及土壤微生物(尤其是细菌、固氮菌)等的总体变化趋势基本吻合。

2.3 土壤生物性质的变化特征

2.3.1 土壤微生物区系 土壤微生物区系及其数量分布不仅可以敏感地反映土壤环境质量的变化,而且亦是土壤生物活性的具体体现^[22]。不同培肥方式对不同土层土壤真菌、耕层土壤放线菌的增殖普遍具有不同程度的抑制作用。2~30、31~60cm 土层,土壤真菌数均普遍低于 CK,其平均值较 CK 相应土层分别降低 27.6%和 11.2%;2~30、31~60cm 土层放线菌平均值较 CK 相应土层则分别呈下降(46.1%)和上升(163.8%)趋势。表 6 所示,各处理耕层土壤细菌分别为真菌、放线菌平均数量的 77.5 万倍和 26.6 万倍,31~60cm 土层则分别为 0.74 万倍和 0.99 万倍。可见,各土层土壤细菌在微生物区系构成中均占绝对优势,反映了供试土壤条件下细菌的主导地位。但不同培肥方式对 31~60cm 土层细菌的增殖具有较为显著的促进作用,平均较 CK 相应土层增加 313.8%,远高于细菌集中分布的耕层土壤 30.6%的平均增幅,这亦是该土层有机质及有效养分均值分别低于和高于 CK 的一个重要原因。单施化肥时,耕层土壤细菌平均增幅(57.5%)不仅明显高于各有机肥主区 10.2%~36.2%的平均增幅,且耕层土壤细菌随化肥用量递增而下降,至最高化肥用量(M₀N₃P₃K₃)时则低于 CK,这与此条件下土壤有效氮的变化趋势完全一致。前已述及,基于作物吸收和养分淋失共同作用的土壤有效氮的这种变化必然直接影响到对土壤生物过程具主导作用的土壤细菌的营养环境,而其数量的下降又必将对土壤潜在养分的转化与释放产生不利影响。M₁~M₃ 主区,土壤细菌

均随化肥用量递增而增加,并均至最高化肥用量时高于CK,这是否与此条件下有机-无机肥对土壤细菌营养环境的协调与改善作用较强尚待进一步研究。

表 5 退化土壤 0~100cm 土层有效养分变化特征(mg/kg)

Table 5 Profile distribution feature of available nutrient in different treatment

处理 Treatment	N			P ₂ O ₅			K ₂ O		
	0~30cm	31~60cm	61~100cm	0~30cm	31~60cm	61~100cm	0~30cm	31~60cm	61~100cm
CK	22.80	32.67	57.75	5.42	6.59	6.70	33.20	35.11	40.17
M ₀ N ₁ P ₁ K ₁	40.76	53.78		8.55	6.43		32.36	25.75	
M ₀ N ₂ P ₂ K ₂	49.64	75.71		22.29	25.52		46.76	43.39	
M ₀ N ₃ P ₃ K ₃	28.27	91.23	36.09	20.70	7.03	4.62	44.14	39.09	32.66
M ₁ N ₀ P ₀ K ₀	41.06	41.80		16.05	6.22		29.26	33.26	
M ₁ N ₁ P ₁ K ₁	56.39	45.16		20.92	6.47		37.33	29.05	
M ₁ N ₂ P ₂ K ₂	55.50	43.01		26.50	7.40		34.24	33.04	
M ₁ N ₃ P ₃ K ₃	48.66	60.72	20.48	28.62	6.74	6.49	48.93	44.09	39.52
M ₂ N ₀ P ₀ K ₀	34.95	59.19		25.39	12.54		49.62	33.12	
M ₂ N ₁ P ₁ K ₁	57.77	54.64		15.22	4.93		41.26	29.66	
M ₂ N ₂ P ₂ K ₂	80.47	36.44		14.81	8.16		30.07	23.65	
M ₂ N ₃ P ₃ K ₃	63.38	49.59	50.77	33.03	8.50	6.14	74.93	37.27	28.17
M ₃ N ₀ P ₀ K ₀	29.02	73.31		9.49	24.77		37.19	47.59	
M ₃ N ₁ P ₁ K ₁	89.57	63.19		37.31	8.29		83.68	46.29	
M ₃ N ₂ P ₂ K ₂	50.22	50.15		25.52	6.65		40.10	32.66	
M ₃ N ₃ P ₃ K ₃	81.36	48.90	64.24	21.72	6.76	6.50	53.74	33.74	26.92

表 6 不同土层微生物区系及主要生理类群

Table 6 Microflora and main physiological group of soil profile(2~60cm horizon)

处理 Treatment	细菌 ^① (×10 ⁸ ·g)		真菌 ^② (×10 ⁴ ·g)		放线菌 ^③ (×10 ⁴ ·g)		固氮菌 ^④ (×10 ² ·g)		纤维素分解菌 ^⑤ (×10 ² ·g)	
	2~30cm	31~60cm	2~30cm	31~60cm	2~30cm	31~60cm	2~30cm	31~60cm	2~30cm	31~60cm
CK	81.25	9.11	2.32	1.51	318.59	14.25	12.40	17.70	54.84	38.80
M ₀ N ₁ P ₁ K ₁	179.10	6.69	1.16	0.79	232.87	33.43	14.72	17.86	57.71	36.58
M ₀ N ₂ P ₂ K ₂	150.48	41.73	1.89	1.54	217.09	28.74	6.83	8.31	73.83	29.92
M ₀ N ₃ P ₃ K ₃	54.39	19.41	1.81	1.23	160.35	48.73	7.25	0.28	87.02	36.84
M ₁ N ₀ P ₀ K ₀	102.61	85.37	1.38	1.74	65.99	39.49	6.04	8.38	62.77	54.25
M ₁ N ₁ P ₁ K ₁	32.05	47.76	1.62	1.31	98.93	34.63	2.40	0.20	63.28	62.09
M ₁ N ₂ P ₂ K ₂	67.86	45.92	1.99	0.91	225.663	59.37	4.01	0.71	46.17	45.92
M ₁ N ₃ P ₃ K ₃	240.272	29.40	1.78	1.29	75.08	35.28	1.73	1.58	108.27	40.77
M ₂ N ₀ P ₀ K ₀	149.620	39.86	1.70	1.69	401.419	34.22	2.43	3.46	74.60	40.26
M ₂ N ₁ P ₁ K ₁	50.03	22.98	1.45	1.43	150.505	33.68	8.47	5.27	71.42	21.40
M ₂ N ₂ P ₂ K ₂	57.93	13.24	1.15	1.65	171.408	21.26	6.56	2.81	81.60	40.51
M ₂ N ₃ P ₃ K ₃	100.637	31.63	2.05	2.24	162.376	20.80	3.26	1.24	72.97	59.26
M ₃ N ₀ P ₀ K ₀	64.22	63.30	0.87	1.28	149.842	60.09	1.58	4.45	67.39	59.29
M ₃ N ₁ P ₁ K ₁	78.23	25.01	3.01	1.11	130.114	56.36	4.94	0.95	67.11	31.76
M ₃ N ₂ P ₂ K ₂	86.51	24.83	1.78	0.76	107.726	55.26	2.45	0.28	59.98	29.64
M ₃ N ₃ P ₃ K ₃	178.271	67.15	1.60	1.09	227.816	20.63	2.45	0.53	58.48	25.89

①Bacterium ②Fungus ③Actinomyces ④Nitrogen-fixing bacteria ⑤Cellulose-decomposing bacterium

不同主区间,各有机肥主区不同土层细菌、真菌、放线菌平均值(2~30cm 土层放线菌除外)均高于 M₀ 主区。其中,31~60cm 土层细菌、真菌、放线菌平均值分别较 M₀ 主区提高 115.1%、8.8% 和 25.5%,这对促进深层土壤有机残体分解和潜在养分转化,提高土壤肥力均具有重要作用。值得指出的是,试验条件下土壤细菌、放线菌较为悬殊的土体差异,与不同土层土壤容重、土壤孔隙度、土壤养分及有机质的总体变化趋势亦相吻合。就土壤微生物与土壤 pH、有机质及有效养分的关系而言(表 7),石灰性土壤条件下,2~30cm 土层细菌,特别是放线菌与 pH 的显著负相关均与土壤微生物的一般生长规律不符^[15, 23];土壤微生物与土壤有效养分的关系则较为复杂,耕层土壤有机质、有效养分与土壤细菌,特别是放线菌的相关性与国内外的许多研究结果不相一致^[21]。

2.3.2 土壤微生物主要生理类群 作为土壤微生物的主要生理类群,固氮菌、纤维素分解菌直接参与土壤 C、N 等营养元素的

表 7 土壤微生物与土壤肥力因子的相关性(r)

Table 7 Interrelation of soil microbial and soil fertility factors in different horizon

项目 Item	土层(cm) Horizon	细菌 Bacterium	真菌 Fungus	放线菌 Actinomycetes	固氮菌 Nitrogen-fixing bacteria	纤维素分解菌 Cellulose-decomposing bacterium
pH	0~30	-0.4727	-0.2301	-0.6621*	0.1804	-0.0786
	31~60	0.0924	-0.0161	-0.0254	-0.1385	0.0319
有机质 Organic matter	0~30	0.0455	0.2222	-0.2131	-0.7854	0.2435
	31~60	0.3671	0.6578*	0.3578	0.1157	0.5255*
速效氮 Avail. N	0~30	-0.0163	0.2734	-0.2639	-0.2663	-0.0181
	31~60	0.0542	-0.3071	0.4264	-0.0665	-0.1083
速效磷 Avail. P	0~30	-0.0311	0.4209	-0.5562*	-0.6250*	0.1933
	31~60	0.3404	-0.3682	-0.0538	0.0611	0.1399
速效钾 Avail. K	0~30	0.1480	0.6695*	-0.0437	-0.3280	0.2063
	31~60	0.4846	0.0492	0.3249	-0.2029	0.0665

循环和能量流动,其数量和活性直接关系着土壤生态系统的维持与改善。试验条件下,除最低化肥用量($M_0N_1P_1K_1$),其它培肥方式对不同土层固氮菌的增殖均具不利影响,且各主区内固氮菌数量基本随养分投入量的递增而呈不同程度的下降;对纤维素分解菌的增殖则具有不同程度的促进作用。表 6 可见,不同处理 2~30、31~60cm 土层固氮菌平均较 CK 降低 59.6% 和 78.8%,纤维素分解菌则分别提高 28.0% 和 5.6%。其中,耕层纤维素分解菌均不同程度的高于 31~60cm 土层,平均增幅达 69.5%。有关研究表明^[21],土壤有效氮较多时,即可被固氮细菌充分利用以生长繁殖,而当有效氮因之大量减少或消失时,其固氮能力则再度恢复,总固氮量亦呈显著提高。因此,若从作物的全生育期来看,适度的氮肥供应对生物固氮具有促进作用。本试验中,固氮菌变化较为复杂,单施有机肥、化肥(除 $M_0N_3P_3K_3$ 处理)时,其变化与有机肥主区不同,各处理耕层土壤固氮菌数量不仅均低于 31~60cm 土层,且随有机肥、化肥亦即氮素递增反呈明显下降,表现出与细菌、有效氮相同的变化趋势,这不仅与根系氮素吸收及其产量差异有关,耕层土壤有效氮的大量淋失亦是其重要原因之一。

一般而言,固氮菌与纤维素分解菌存在着典型的互生关系,后者为前者提供能源,前者则为后者提供氮素营养^[21]。但试验条件下,固氮菌(x)与纤维素分解菌(y)均呈负相关,其在 2~30、31~60cm 土层的相关系数分别为 $-0.2319(y=73.9925-0.8880x)$ 、 $-0.2220(y=43.1214-0.4808x)$,而土壤有效氮对自生固氮作用的抑制可能是产生此现象的一个重要原因^[21]。表 7 可见,由于在一定范围内土壤固氮菌随土壤有效氮增加而减少,亦同时相对减少了其向纤维素分解菌所能提供的氮素营养。纤维素分解是土壤有机残体分解的中心环节,直接关系到土壤有机质的形成与积累。0~30、31~60cm 土层纤维素分解菌与有机质呈正相关和显著正相关,不仅表明纤维素分解菌对土壤有机残体分解的重要作用,而且体现了有机肥对纤维素分解菌增殖与活动的重要影响。

3 试验效益分析及土壤复退对策

不同培肥方式对土壤物理、化学和生物性质的影响具有较为明显的一致性,作物产量效应亦与土壤肥力的总体变化特征基本一致。不同培肥方式下,耕层土壤有机质的积累速率以及不同土层全量及有效养分中氮、磷的绝对增长量均较大,不同土层有效钾,特别是全钾增幅较小。其中,氮、磷在耕层土壤中的增幅表现为全氮>有效氮、全磷<有效磷,31~60cm 土层则表现为全氮<有效氮、全磷>有效磷。同时,有机-无机肥配合施用对减少土壤养分淋失亦具重要作用。就土壤微生物而言,不同土层细菌在土壤微生物区系构成中均占绝对优势,体现了细菌的主导地位;而不同培肥方式对 2~30、31~60cm 土层真菌、固氮菌以及 2~30cm 土层放线菌的繁殖普遍具有不同程度的抑制作用;土壤团聚体是土壤有机质、土壤微生物等肥力因素综合作用的结果,对养分、水分更具调控作用的土壤微团聚体(<0.25 mm)尚待进一步形成与稳定。特别指出的是,纯化肥投入时,由于所用化肥实为不同配比的氮、磷、钾组合,故其对土壤微生物营养环境的协调与改善作用较为全面,有助于有机物料和土壤有机残体的腐解进程,这是试验条件下化肥对土壤肥力亦能产生重要影响的关键因素,充分体现了其“以无机促有机”的重要作用,这对燃料、饲料、肥料矛盾极为突出,有机肥源严重匮乏的西藏高原具有特别意义。

有关研究表明,长期处于同一耕作制度下的土壤有机质含量已达稳定状态,轮作、施肥等的改变将使其发生变化,但无论上升或下降,一般需十几年、甚至更长时间才能达致新的平衡^[14]。试验条件下,耕层土壤有机质的平均含量、平均增幅分别达 22.68 g/kg 和 85.6%,个别处理土壤有机质含量更达一般分级标准的高量(>25.0 g/kg)水平,但就西藏高原而言,这一含量则仍属较低水平^[14,17]。因此,从土壤复退的长期性和作物高产的实际需要考虑,土壤有机质含量的持续、稳步提高是土壤复退过程中尚待解决的关键因素。土壤养分中,耕层有效磷平均含量高达 21.74 mg/kg,全氮、有效钾含量极低,其均值仅分别为 0.177 g/kg 和 45.57 mg/kg。其中,耕层土壤全氮仅分别为西藏(1.50g/kg)和全国(1.05 g/kg)农田土壤平均水平的 11.7% 和 16.7%^[14];0~60cm 土层全钾含量不仅远低于西藏湖水平均值(22.8 g/kg),且低于我国全钾谷值区的广西砖红壤(3.6 g/kg)

地区^[14];土壤有效钾含量则基本低于 50 mg/kg 的极度缺钾临界水平^[18]。因此,在较高有机肥施用量基础上,重施氮肥、适施磷肥、增施钾肥对西藏中部退化土壤的结构重建及肥力恢复具有重要意义。

表 8 产量效应及其差异显著性(kg/hm²)
Table 8 Wheat yield and significance of difference

处理 Treatment	产量 Yield	处理 Treatment	产量 Yield	LSR							
				主区(有机肥) ^①				副区(化肥) ^②			
				产量 Yield	5%	1%	产量 Yield	5%	1%		
CK	1225.5	M ₂ N ₀ P ₀ K ₀	1674.8								
M ₀ N ₁ P ₁ K ₁	1402.5	M ₂ N ₁ P ₁ K ₁	1737.0								
M ₀ N ₂ P ₂ K ₂	1677.8	M ₂ N ₂ P ₂ K ₂	1953.0	M ₀	3009.0	c	B	F ₀	3090.0	b	B
M ₀ N ₃ P ₃ K ₃	1711.5	M ₂ N ₃ P ₃ K ₃	2162.3	M ₁	3283.5	bc	B	F ₁	3357.0	b	B
M ₁ N ₀ P ₀ K ₀	1355.3	M ₃ N ₀ P ₀ K ₀	1923.8	M ₂	3763.5	ab	AB	F ₂	3805.5	a	AB
M ₁ N ₁ P ₁ K ₁	1561.5	M ₃ N ₁ P ₁ K ₁	2012.3	M ₃	4251.0	a	A	F ₃	4056.0	a	A
M ₁ N ₂ P ₂ K ₂	1796.3	M ₃ N ₂ P ₂ K ₂	2184.0	F = 3895.14 * *				F = 3882.07 * *			
M ₁ N ₃ P ₃ K ₃	1855.5	M ₃ N ₃ P ₃ K ₃	2382.8	SE = 11.69				SE = 9.33			

① Main plot(organic matter) ② Sub-plot(chemical fertilizer)

4 结论

退化农田土壤的肥力演变是在一定的生态条件下土壤物理、化学和生物因素共同作用、彼此影响、相互促进的结果。试验表明,在西藏高原高寒以及干旱、半干旱条件下,自然状态(无肥处理)下土壤剖面全量养分的变化较试前不甚明显,有效养分则普遍呈不同程度的下降趋势;相对于不同培肥方式,其物理、化学和微生物性质的总体变化更具显著下降的重要特征。化肥、有机肥,特别是有机-无机肥配合施用,在协调土壤环境,促进以细菌为主导以及对土壤有机残体降解具重要作用的纤维素分解菌等土壤微生物的繁殖,促进土壤有机质形成、积累以及土壤结构重建,显著提高土壤氮、磷库容及其有效性等方面具有显著、迅速的重要作用。不同处理土壤物理、化学和生物特性呈现出相对一致的总体变化特征和较为明显的恢复态势,突出地反映了高原退化土壤所具有的在相对较短的时间内实现肥力恢复及结构重建的可能性及其潜力,这与以往所普遍认为的西藏高原土壤生态系统甚为脆弱且极不稳定,一旦退化便难以恢复的诸多研究结论不尽一致。但就其总体肥力变化特征而言,不同培肥方式下的土壤肥力状态,特别是土壤有机质、全氮、有效钾以及微团粒结构尚远未达致正常土壤的肥力水平及其要求,适于土壤微生物,特别是真菌、固氮菌正常生长、繁殖的稳定的土壤环境远未形成,尚需较长时期的土壤恢复过程。因此,退化土壤复退过程中长期的耕作影响亦须进一步研究。

References:

- [1] Zhang G L, Gong Z T. Challenges and Opportunities of Soil Science in the Dawn of the New Century: The Future of Soil Science Viewed from the 16th World Soil Congress. *Soil and Environmental Sciences*, 1999, 8(2): 130~136.
- [2] Zhang T L, Wang X X. Development and Orientation of Research Work on Soil Degradation. *Journal of natural resources*, 2000, 15(3): 280~284.
- [3] Lu J W, Li Z B. The Development in Research Work on Soil Degradation. *Soil and Environmental Sciences*, 2001, 10(1): 72~75.
- [4] Fan J, Hao M D, Dang Y H. Effect of Long-term Fertilization on Nutrient Distribution in Profiles of Black Loessial Soil. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2001, 7(3): 249~253.
- [5] Sun B, Zhang T L, Zhao Q G. Fertility Evolution of Red Soil Derived from Quaternary Red Clay in Low-hilly Region in Middle Subtropics I. Evolution of Soil Chemical and Biological Fertilities. *Acta Pedologica Sinica*, 1999, 36(2): 203~217.
- [6] Whitney D, Srone L, Janssen K, et al. Comparative effects nitrogen sources on soil chemical and physical characteristics. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1991, 55: 1097~1099.
- [7] Li K J, Zhang S F, Jia W Z, et al. Effect of Long-term Fertilization on Crop Yield and Soil Fertility in Semi-arid Area. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1999, 5(1): 21~25.
- [8] Chen Y A, Chen D H, You Y W, et al. Variations of Red Earth Fertility and Available Techniques of Fertilization. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1999, 5(2): 115~121.
- [9] Zhang M K, Xu J M. Restoration Characteristics of Fertility Quality of Degraded Red Soil in Subtropics of China. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(1): 67~71.
- [10] Ren T Z, Stefano Grego. Soil bioindicators in sustainable agriculture. *Scientia Agriculture Sinica*, 2000, 33(1): 1~9.
- [11] Shi D M, Wei Q F, Liang Y, et al. Study on degradation index system of eroded soils in Southern China. *Journal of Soil and Water*

Conservation, 2000, **14**(3): 1~9.

- [12] Sun B, Zhang T L, Zhao Q G. Fertility Evolution of Red Soil Derived from Quaternary Red Clay in Low-hilly Region in Middle Subtropics I. Evolution of Soil Physical Fertility. *Acta Pedologica Sinica*, 1999, **36**(1): 35~47.
- [13] Yu J Y. Soil Texture and Structure. In: Huang C Y ed. *Soil Science*. Beijing: Chinese Agricultural Press, 2000. 86~88.
- [14] Lin X X. Chinese situation and management of soil organic matter. In: Shen S M ed. *Chinese Soil Fertility*. Beijing: Chinese Agricultural Press, 1998. 111~154.
- [15] Liang G Q, Lin B, Lin J X, et al. Effect of long-term fertilization on the forms of nitrogen in calcareous fluvo-aquic soil. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2000, **6**(1): 3~9.
- [16] Zhu Z L. Chinese soil nitrogen fertility and agricultural nitrogen management. In: Shen S M ed. *Chinese Soil Fertility*. Beijing: Chinese Agricultural Press, 1998. 160~206.
- [17] Land Administrative Office of Tibrt. *Tibet Soil Resource*. Beijing: Science Press, 1994. 495~514.
- [18] Lu R K. *Principle and Apply Fertilizer of Soil-Plant Nutrition*. Beijing: Chemical Industry Press, 1998. 120~165.
- [19] He N Z, Meng C F. *Principle of Plant Nutrition*. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1987. 137~145.
- [20] Bao S D. *Soil Agrochemistry Analysis*. Beijing: Chinese Agricultural Press, 2000. (3): 80~81.
- [21] Chen W X. *Soil and Enviromental Microecology*. Beijing: Beijing Agricultural University Press, 1990. 19~35, 73~194.
- [22] Long J, Huang CH y, Teng Y, et al. Characteristics of soil microbes of reclaimed minesoil in red soil area, Southern China. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, **16**(2): 126~128.

参考文献:

- [1] 张甘霖, 龚子同. 世纪之交土壤学研究的挑战和契机——从第16届世界土壤学大会看土壤学的未来. *土壤与环境*, 1999, **8**(2): 130~136.
- [2] 张桃林, 王兴祥. 土壤退化研究的进展和趋向. *自然资源学报*, 2000, **15**(3): 280~284.
- [3] 卢金伟, 李占斌. 土壤侵蚀退化研究进展. *土壤与环境*, 2001, **10**(1): 72~75.
- [4] 樊军, 郝明德, 党廷辉. 长期定位施肥对黑垆土剖面养分分布特征的影响. *植物营养与肥料学报*, 2001, **7**(3): 249~253.
- [5] 孙波, 张桃林, 赵其国. 我国中亚热带缓丘区红粘土红壤肥力的演化 I. 化学和生物学肥力的演化. *土壤学报*, 1999, **36**(2): 203~217.
- [7] 李科江, 张素芳, 贾文竹, 等. 半干旱地区长期施肥对作物产量和土壤肥力的影响. *植物营养与肥料学报*, 1999, **5**(1): 21~25.
- [8] 陈永安, 陈典毫, 游有文, 等. 红壤旱地肥力变化及有效施肥技术. *植物营养与肥料学报*, 1999, **5**(2): 115~121.
- [9] 张明奎, 徐建民. 亚热带低丘区退化红壤肥力质量恢复性能的研究. *水土保持学报*, 2002, **16**(1): 67~71.
- [10] 任天志, Stefano Grego. 持续农业中的土壤生物指标研究. *中国农业科学*, 2000, **33**(1): 1~9.
- [11] 史德明, 韦启潘, 梁音, 等. 中国南方侵蚀土壤退化指标体系研究. *水土保持学报*, 2000, **14**(3): 1~9.
- [12] 孙波, 张桃林, 赵其国. 我国中亚热带缓丘区红粘土红壤肥力的演化 I. 物理学肥力的演化. *土壤学报*, 1999, **36**(1): 35~47.
- [13] 俞劲爽. 土壤质地和结构. 见: 黄昌勇主编. *土壤学*. 北京: 中国农业出版社, 2000. 86~88.
- [14] 林心雄. 中国土壤有机质状况及其管理. 见: 沈善敏主编. *中国土壤肥力*. 北京: 中国农业出版社, 1998. 111~154.
- [15] 梁国庆, 林葆, 林继雄, 等. 长期施肥对石灰性潮土氮素形态的影响. *植物营养与肥料学报*, 2000, **6**(1): 3~9.
- [16] 朱兆良. 中国土壤的氮素肥力与农业中的氮素管理. 见: 沈善敏主编. *中国土壤肥力*. 北京: 中国农业出版社, 1998. 160~206.
- [17] 西藏自治区土地管理局. *西藏自治区土壤资源*. 北京: 科学出版社, 1994. 495~514.
- [18] 鲁如坤. *土壤-植物营养学原理和施肥*. 北京: 化学工业出版社, 1998. 120~165.
- [19] 何念祖, 孟鸱福. *植物营养原理*. 上海: 上海科学技术出版社, 1987. 137~145.
- [20] 鲍士旦. *土壤农化分析*. 北京: 中国农业出版社, 2000. 80~81.
- [21] 陈文新. *土壤和环境微生物学*. 北京: 北京农业大学出版社, 1990. 19~35, 73~194.
- [22] 龙健, 黄昌勇, 腾应, 等. 我国南方红壤矿山复垦土壤的微生物特征研究. *水土保持学报*, 2002, **16**(2): 126~128.