

西藏中部退化农田土壤肥力的变化特征及其重建*

蔡晓布 钱 成 彭岳林 旦 巴

(西藏农牧学院农学系, 西藏林芝 860000)

摘 要 通过田间定位试验, 就西藏中部退化土壤化学和生物学肥力的变化等进行了研究。结果表明, 无肥状态下土壤养分的变化具有极大的不平衡性, 不同土层全钾、有效钾的下降速率均甚显著。有机肥, 特别是有机—无机肥在促进土壤细菌繁殖和土壤有机质形成、改善腐殖质结构等方面具有显著作用, CEC、交换性盐基总量以及土壤氮、磷库容及其有效性亦呈明显提高, 全钾、有效钾的亏缺程度逐渐下降, 土壤氮、磷、钾的年均平衡量与其年均变化量间均呈不同程度的正相关, 但土壤微生物区系仍处于极不协调的状态。在有机肥持续投入的基础上, 增施氮肥、适施磷肥、重施钾肥对退化土壤的肥力恢复与重建具有重要作用。

关键词 土壤退化; 土壤培肥; 肥力演变; 西藏高原

中图分类号 S158 **文献标识码** A

近年来, 有关土壤退化的研究主要集中在土壤特性的时空变化、土壤退化过程和机理、退化过程模拟与预测, 以及对不同区域土壤退化的描述或评价等方面^[1~4]。面临日益严峻的资源与环境问题, 退化土壤的恢复与重建、改善环境中的土壤问题等已成为国际土壤科学的一个重要发展动向^[1]。第 17 届国际土壤学大会再次强调了这一问题^[1]。西藏中部是西藏高原种植业光、温、水潜力的高值区和粮食主产区, 日趋严重的土壤退化对现今区域生态环境和经济发展已构成了严峻挑战。目前, 土壤肥力演变的中、长期定位研究在西藏高原尚未开展, 本研究仅以不同有机—无机肥条件下的裸大麦 (*Hordeum vulgare* L. var. *nudum* Hook. f.) 3 年连作为时间尺度, 以试验小区和土壤剖面为空间尺度, 对土壤全量养分及其有效性、CEC、交换性盐基总量以及土壤有机质、腐殖质组成、土壤微生物区系及其主要生理类群等土壤化学和生物学特性的变化进行了研究, 这对了解西藏高原土壤退化过程、恢复和重建退化土壤肥力提供了重要信息, 具有重要的理论和实践意义。

1 研究方法

1.1 研究区域

拉萨河下游谷地平均海拔 3 649 m, 河谷地形平

坦, 土层深厚; 属高原温带季风半干旱气候类型, 年平均气温 7.5℃, 无霜期 136 d, 多年平均降水量、蒸发量分别为 444.8 mm 和 2 205.6 mm, 干季(10 月~5 月)分别占 5% 和 70%。种植制度为一年一熟制, 以麦类作物为主。由于“三料”矛盾突出, 农田养分投入以少量磷酸二铵为主。供试土壤为垦殖历史近 60 年, 并已发生严重退化的石灰性壤质耕种山地灌丛草原土(0~30、30~60 cm 土层 CaCO₃ 含量分别为 2.6 和 3.7 g kg⁻¹), 粘土矿物以 2:1 型(伊利石)为主, 试验前不同土层有机质及养分含量见文中各有关图表。

1.2 试验设计及采样方法

试验于 2001~2003 年 3 月~8 月春播(裸大麦)条件下定点(定位)进行。采用 3×4 裂区随机设计, 2 次重复, 小区面积 25 m²(6.6 m×3.8 m)。即以有机肥(半腐熟普通堆肥, 含 N、P₂O₅、K₂O、有机质分别为 6.30、4.10、1.85 和 217.10 g kg⁻¹)为主区(M), M₁、M₂、M₃ 主区有机肥年投入量分别为 6.75×10³、13.50×10³、20.25×10³ kg hm⁻²; 化肥为副区, 氮、磷、钾肥分别为尿素、过磷酸钙、硫酸钾, 年投入量以 N-P₂O₅-K₂O 计, N₀P₀K₀、N₁P₁K₁、N₂P₂K₂、N₃P₃K₃ 分别为 0-0-0、50.0-15.0-35.0、60.0-18.0-42.0、72.0-21.6-50.4 kg hm⁻²; 以

* 国家自然科学基金项目(40061004)资助

作者简介: 蔡晓布(1962~), 男, 汉族, 副教授, 从事土壤生态与植物营养的教学与研究工作

收稿日期: 2003-09-15; 收到修改稿日期: 2003-12-15

无肥处理为对照(CK)。有机肥、化肥均作基肥施入耕层;裸大麦播种量、播种密度分别为 170 kg hm^{-2} 和每小区 30 行;收获后即将麦茬(3 cm)翻埋入土,直至次年春播。

2001 年 3 月于基肥投入前用土钻按 0~30、30~60 cm 土层分别随机采取 10 个土样组成 2 个土壤混合样品以测定试前土壤养分含量;2003 年在第 3 茬裸大麦收获前,于各小区随机选取 5 个样点,按 0~30、30~60 cm 土层采集土样并分别组成混合样品(微生物测定土样自 2 cm 土层起采集),并于各小区随机选取 10 株裸大麦组成 13 个混合样品以测定地上部收获物(籽粒、秸秆、叶片)养分含量。

1.3 测定方法

分别采用水杨酸—锌粉还原法、 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮—钼钒黄比色法、 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮—火焰光度计法测定种子以及地上部收获物全 N、 P_2O_5 、 K_2O 含量;土壤有机质、腐殖质分别采用重铬酸钾容量法—外加热法、焦磷酸钠提取—重铬酸钾法;全 N、 P_2O_5 、 K_2O 测定分别采用半微量开氏法、NaOH 熔融—钼锑抗比色法和 NaOH 熔融—火焰光度法,土壤有效 N、 P_2O_5 、 K_2O 测定分别采用碱解蒸馏法、 $0.5 \text{ mol L}^{-1} \text{NaHCO}_3$ 法和 $2 \text{ mol L}^{-1} \text{HNO}_3$ 溶液浸提—火焰光度法, NO_3^- 、 NH_4^+ 采用酚二磺酸比色法和 $2 \text{ mol L}^{-1} \text{KCl}$ 浸提—蒸馏法, CEC、交换性盐基总量采用乙酸钠—火焰光度法和 $1 \text{ mol L}^{-1} \text{NH}_4 \text{OAc}$ 法;土壤细菌、真菌、放线菌、固氮菌、纤维素分解菌测定均采用 23°C 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。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 土壤有机质及腐殖质的变化

2.1.1 土壤有机质 土壤有机质的消长对土壤性质和过程有着极为深刻的影响。图 1 可见,与试前相比,无肥处理(CK) 0~30、30~60 cm 土层有机质无明显变化,均处于较低水平。 $M_1 \sim M_3$ 主区,各处理 0~30、30~60 cm 土层有机质较试前分别提高 11.5%~34.5%、2.2%~34.5%,平均增幅达 20.7%和 16.6%,不仅呈现出随有机肥或化肥递增而增加的趋势,土体差异较试前亦呈明显扩大。表

明不同培肥方式对土壤根系活动层,特别是耕层土壤有机质的形成具有显著的促进作用,这与只有经较长时间才能显现出来的有关研究结论不同^[5, 6]。就有机质变化速率而言, $M_1 \sim M_3$ 主区 0~30、30~60 cm 土层有机质年均累积量均甚显著,分别在 $0.75 \sim 2.26 \text{ g kg}^{-1}$ 和 $0.09 \sim 1.39 \text{ g kg}^{-1}$ 之间,平均分别达 1.35 和 0.67 g kg^{-1} 。其中, M_1 、 M_2 、 M_3 主区耕层土壤年均累积量分别为 1.02、1.61 和 1.43 g kg^{-1} , 30~60 cm 土层亦分别达 0.42、0.99 和 0.58 g kg^{-1} 。这一结果明显高于我国南方以及黄淮海冲积平原区土壤培肥过程中有机质的年增长量^[7, 8]。有机肥、有机—无机肥对土壤细菌生长与繁殖的极为显著地促进作用是加速土壤有机残体分解和有机质形成的主要原因,自收获至次年春播长达 200 余天的休闲,以及壤性的土壤质地、游离碳酸钙的存在等亦是重要因素^[5]。

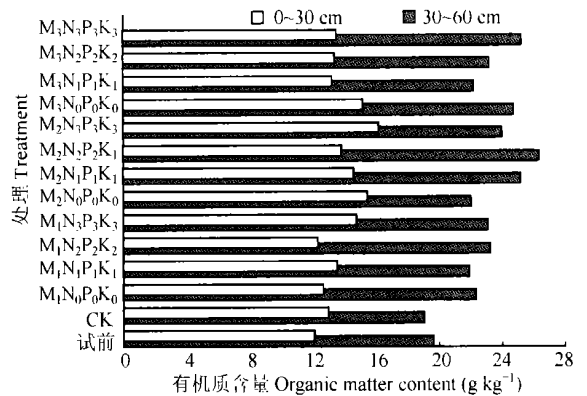


图 1 西藏中部退化农田土壤有机质变化特征

Fig. 1 Changes in organic matter content in degraded farmland soil in Central Tibet

2.1.2 腐殖质组成 土壤腐殖质是有机质的重要组成部分。统计分析表明,0~30、30~60 cm 土层腐殖质碳与土壤有机碳分别呈显著正相关($r = 0.6569$, $r^2 = 0.4316$)和正相关($r = 0.3319$)。表 1 可见,各处理 0~30、30~60 cm 土层腐殖质碳分别占有有机碳的 45% 和 30% 以上,且各主区平均值均随有机肥递增而增加。同时,不同培肥方式的土壤耕层腐殖质总量均明显高于下层土壤。说明随着土壤的肥力培育,胡敏酸结构趋于复杂,有利于其在表层的逐渐积累^[9]。腐殖质组成中,各处理 0~30、30~60 cm 土层均以富里酸碳(FA-C)为主,胡敏酸碳(HA-C)分别占腐殖质碳的 23.0%~42.3%、20.4%~43.9%。其中,绝大多数处理耕层 HA-C 在腐殖质碳构成中所占比例大于 30%,明显高于 CK。

不同主区间、同一主区内,各土层 HA-C 占腐殖质碳 的比例亦随有机肥或化肥递增而趋于提高。

表 1 西藏中部退化农田土壤腐殖质组成

Table 1 Humus composition of degraded farmland soil in Central Tibet

处理 ¹⁾ Treatment	提取碳占 有机碳% ^①		胡敏酸碳 HA-C (g kg ⁻¹)		富里酸碳 FA-C (g kg ⁻¹)		HA/FA		pH	
	0~	30~	0~	30~	0~	30~	0~	30~	0~	30~
	30 cm	60 cm	30 cm	60 cm	30 cm	60 cm	30 cm	60 cm	30 cm	60 cm
CK	49.2	63.5	1.49	1.73	3.95	3.04	0.377	0.569	7.8	7.9
M ₁ N ₀ P ₀ K ₀	54.3	46.2	2.47	0.98	4.57	2.41	0.540	0.407	7.3	7.4
M ₁ N ₁ P ₁ K ₁	49.3	31.3	1.91	0.50	4.34	1.96	0.440	0.255	7.2	7.4
M ₁ N ₂ P ₂ K ₂	56.7	43.7	2.41	1.20	5.25	1.93	0.549	0.622	7.5	7.5
M ₁ N ₃ P ₃ K ₃	45.7	59.1	2.09	1.97	4.04	3.11	0.517	0.633	7.4	7.5
M ₂ N ₀ P ₀ K ₀	54.0	69.8	1.59	2.27	5.32	3.99	0.299	0.563	7.5	7.4
M ₂ N ₁ P ₁ K ₁	46.6	39.1	2.35	1.35	4.47	1.97	0.526	0.685	7.8	7.3
M ₂ N ₂ P ₂ K ₂	51.9	72.2	2.97	1.62	4.97	4.20	0.598	0.386	7.7	7.4
M ₂ N ₃ P ₃ K ₃	62.1	46.2	2.77	1.91	5.89	2.44	0.470	0.783	7.4	7.5
M ₃ N ₀ P ₀ K ₀	64.1	57.8	2.82	1.44	6.39	3.65	0.441	0.395	7.4	7.5
M ₃ N ₁ P ₁ K ₁	49.8	76.6	2.48	1.95	3.96	3.96	0.626	0.492	7.0	7.3
M ₃ N ₂ P ₂ K ₂	45.9	55.1	2.62	1.44	3.58	2.80	0.732	0.514	7.3	7.2
M ₃ N ₃ P ₃ K ₃	64.7	66.6	3.43	1.79	6.09	3.42	0.563	0.523	7.4	7.3

1) M₁、M₂、M₃: 有机肥年投入量分别为 6.75×10^3 、 13.50×10^3 、 20.25×10^3 kg hm⁻² Application rates of organic manure are 6.75×10^3 , 13.50×10^3 , 20.25×10^3 kg hm⁻² a⁻¹; N₀P₀K₀、N₁P₁K₁、N₂P₂K₂、N₃P₃K₃: 氮、磷、钾肥年投入量(以 N-P₂O₅-K₂O 计)分别为 0-0-0、50.0-15.0-35.0、60.0-18.0-42.0、72.0-21.6-50.4 kg hm⁻² The N: P: K ratio of fertilizer application (on the basis of N-P₂O₅-K₂O) is 0-0-0, 50.0-15.0-35.0, 60.0-18.0-42.0 and 72.0-21.6-50.4 kg hm⁻² a⁻¹, respectively; CK: 无肥处理 No fertilizer(下同 The same as follows). ①Ratio of extractable organic carbon

HA/FA 比值反映着土壤的熟化程度及肥力状态。M₁~M₃ 主区, 耕层土壤 HA/FA 比值均呈大幅度提高, 平均增幅分别达 35.8%、24.7% 和 56.8%, 腐殖质品质得以明显改善; 30~60 cm 土层, HA/FA 比值的下降趋势较为明显, 尤以 M₃ 主区为甚。显然, 不同土层 HA/FA 比值的趋势不尽一致。不同土层有机物质循环水平的高低直接影响着腐殖质的含量及其构成。试验条件下, 0~30、30~60 cm 土层有机质与 HA/FA 比值的相关系数分别为 0.409 1 和 0.394 6, 有机质与 HA-C 的相关系数则分别达 0.809 0^{*} 和 0.479 1, 并显著高于有机质与 FA-C 的相关程度。施肥状态下土壤腐殖化程度与腐殖质结构的提高和改善, 显示了土壤由低肥力向高肥力的演变趋势。但与西藏高原农田土壤 HA-C、FA-C、HA/FA 平均值 1.15%、1.17% 和 0.98 相比^[10], 各施肥处理土壤腐殖质状况尚远未达到正常土壤的水平。

2.2 土壤全量与有效养分的变化

无肥状态下, 耕层土壤有效磷, 特别是不同土层全钾、有效钾的耗竭甚为显著, 全氮、全磷的变化则

不甚明显, 养分变化的不平衡特征极为突出, 但养分分布的空间格局较试前土壤并未发生明显改变。M₁~M₃ 主区, 土壤全磷、有效磷以及全钾、有效钾的土体分异较试前土壤已呈明显不同, 施肥对土壤养分空间分布的影响极为显著(见表 2)。

各施肥处理土壤全氮仍主要分布于耕层土壤, 但不同土层全氮变化速率较为缓慢, 远低于全钾和耕层土壤全磷; 试前土壤及 CK 处理 30~60 cm 土层明显较高的有效氮含量则在一定程度上反映了供试土壤所具有的营养淋溶和淀积特征。有机-无机肥条件下, 土壤有效氮的土体分异已明显逆转。与试前土壤相比, 各施肥处理耕层有效氮普遍呈积累状态, 且随有机肥递增, 耕层土壤有效氮高于其下层土体的趋势愈为明显。需要指出的是, 土壤深层 NO₃-N 的大幅度提高并未改变耕层土壤有效氮的累积趋势。一般而言, 硝态氮淋失是导致耕层土壤肥力降低的重要因子。本试验中, 各施肥处理 0~30 cm、30~60 cm 土层 NO₃-N 较 CK 均呈显著提高, 其平均累积量分别为 6.7 和 5.2 mg kg⁻¹, 平均增幅分别

达 139.0% 和 59.0% (见图 2)。其中, 耕层累积量随总施氮量增加而增加, 并逐渐表现出高于其下层土体的趋势, 体现了有机-无机肥在改善土壤结构、提高土壤阳离子代换量, 进而增加对耕层土壤 NO_3^- -N 的固持等方面所具有的重要作用^[11], 在一定程度上反映了土壤肥力的进化。从土壤有效氮构成而言,

0~ 30 cm、30~ 60 cm 土层 NH_4^+ -N 均占较大比重(平均分别达 59.8% 和 46.5%), NO_3^- -N 则仅在 6% 以下, 其变化对土壤有效氮的消长亦不足以构成大的影响。单施有机肥时, 各处理不同土层 NO_3^- -N 累积量相对较低, 这与总施氮量较低有着直接关系。

表 2 西藏中部退化农田土壤 0~ 60 cm 土层养分变化特征

Table 2 Changes in nutrient distribution in the 0~ 60 cm soil layer of degraded farmland in Central Tibet

处理 Treatment	全量养分 Total nutrient (g kg^{-1})						有效养分 Available nutrient (mg kg^{-1})					
	N		P_2O_5		K_2O		N		P_2O_5		K_2O	
	0~ 30 cm	30~ 60 cm	0~ 30 cm	30~ 60 cm	0~ 30 cm	30~ 60 cm	0~ 30 cm	30~ 60 cm	0~ 30 cm	30~ 60 cm	0~ 30 cm	30~ 60 cm
试前 Before test	0.71	0.44	1.30	1.72	4.70	4.67	107.9	133.0	27.3	38.6	64.3	51.7
CK	0.69	0.39	1.27	1.81	2.85	2.84	126.6	160.0	14.2	45.8	25.0	26.2
$\text{M}_1\text{N}_0\text{P}_0\text{K}_0$	0.70	0.38	1.98	1.62	3.65	3.70	100.2	104.4	56.6	18.2	23.4	25.4
$\text{M}_1\text{N}_1\text{P}_1\text{K}_1$	0.57	0.28	2.02	1.65	3.44	3.93	111.3	55.7	69.3	19.8	32.7	23.5
$\text{M}_1\text{N}_2\text{P}_2\text{K}_2$	0.69	0.49	2.11	1.54	3.62	3.64	153.1	107.2	60.5	19.8	43.9	24.0
$\text{M}_1\text{N}_3\text{P}_3\text{K}_3$	0.71	0.45	2.11	1.72	3.74	3.79	109.9	94.6	64.0	18.8	41.4	17.8
$\text{M}_2\text{N}_0\text{P}_0\text{K}_0$	0.65	0.63	2.06	1.70	4.07	4.08	104.4	91.9	48.7	18.3	36.4	18.8
$\text{M}_2\text{N}_1\text{P}_1\text{K}_1$	0.97	0.62	2.06	1.67	3.93	4.24	89.1	72.4	51.3	15.7	26.5	16.9
$\text{M}_2\text{N}_2\text{P}_2\text{K}_2$	0.81	0.41	2.07	1.63	4.04	4.27	119.7	132.3	55.0	15.4	28.9	15.4
$\text{M}_2\text{N}_3\text{P}_3\text{K}_3$	0.76	0.51	1.83	1.72	4.13	3.99	130.8	125.3	61.6	26.0	31.8	37.6
$\text{M}_3\text{N}_0\text{P}_0\text{K}_0$	1.00	0.48	2.02	1.76	4.52	4.66	118.3	96.0	74.9	31.6	48.7	42.4
$\text{M}_3\text{N}_1\text{P}_1\text{K}_1$	0.81	0.43	1.99	1.67	4.22	4.34	132.2	87.7	57.0	17.3	26.5	23.1
$\text{M}_3\text{N}_2\text{P}_2\text{K}_2$	0.85	0.44	1.94	1.67	4.20	4.44	109.9	97.4	74.1	18.3	38.1	24.6
$\text{M}_3\text{N}_3\text{P}_3\text{K}_3$	1.19	0.62	1.87	1.71	4.12	4.30	119.7	109.6	46.6	23.5	48.8	29.4

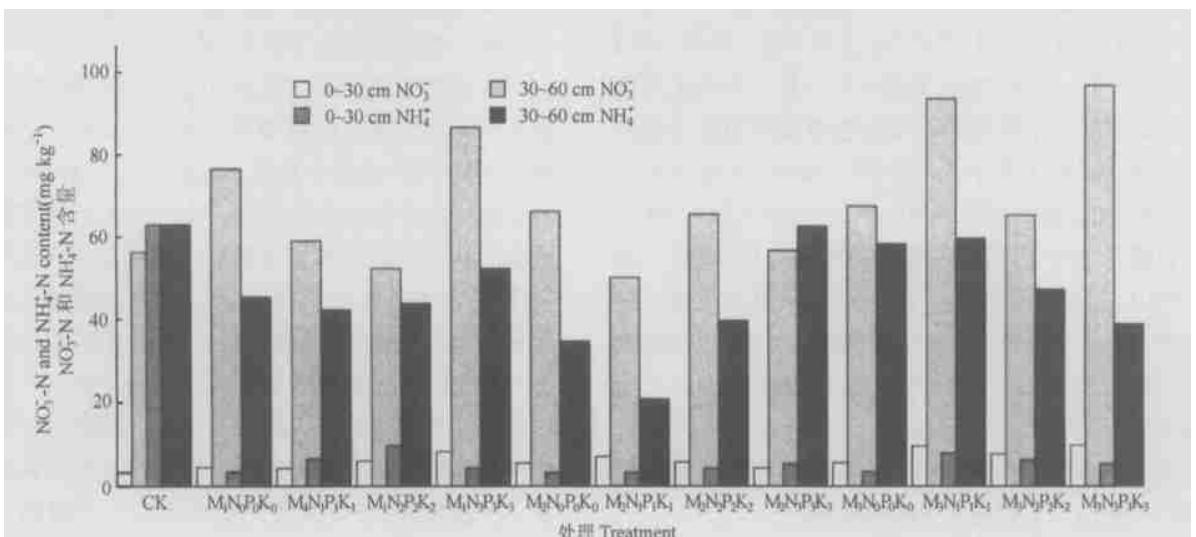


图 2 西藏中部退化农田土壤 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 变化特征

Fig. 2 Changes in soil NO_3^- -N and NH_4^+ -N content in the 0~ 60 cm soil layer of the degraded farmland in Central Tibet

土壤全磷、有效磷的变化趋势基本一致。与试前土壤相比,各施肥处理耕层土壤全磷、有效磷均呈大幅度提高,年均累积量分别达 $0.177 \sim 0.268 \text{ g kg}^{-1}$ 和 $7.1 \sim 15.9 \text{ mg kg}^{-1}$; $30 \sim 60 \text{ cm}$ 土层全磷,特别是有效磷则呈较为明显的下降趋势,年均消耗量分别在 $0.001 \sim 0.059 \text{ g kg}^{-1}$ 和 $2.3 \sim 7.6 \text{ mg kg}^{-1}$ 之间。可见,全磷、有效磷的耕层累积量均远高于下层土壤消耗量,呈现出明显的进化特征。这既与裸大麦相对较低的磷吸收量和化学磷素相对较高的土壤积累能力有关,亦可能与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有关^[12]。同时,土壤全磷、有效磷随养分投入量的不同亦呈现出明显不同的变化规律。其中,耕层、 $30 \sim 60 \text{ cm}$ 土层全磷平均累积量、消耗量均随有机肥或化肥递增而略呈下降,耕层有效磷累积量则在总体上随有机肥或化肥递增而渐趋增加。不同土层全钾、有效钾较试前土壤均呈大幅度下降,但其降幅均随施肥量递增而渐趋下降。 $0 \sim 30 \text{ cm}$ 土层全钾、有效钾年均消耗量分别达 $0.06 \sim 0.42 \text{ g kg}^{-1}$ 和 $5.2 \sim 13.6 \text{ mg kg}^{-1}$, 平均分别达 0.24 g kg^{-1} 和 9.57 mg kg^{-1} ; $30 \sim 60 \text{ cm}$ 土层分别在 $0.01 \sim 0.34 \text{ g kg}^{-1}$ 和 $3.10 \sim 12.10 \text{ mg kg}^{-1}$ 之间,平均分别达 0.19 g kg^{-1} 和 8.7 mg kg^{-1} 。供试土壤极低的全钾、有效钾基础含量,以及裸大麦对钾素较高的吸收量,是导致土壤有效钾含量整体下降的主要

原因。

2.3 CEC 和交换性盐基

图 3 可见,试验条件下的 CEC 均在 30 cmol kg^{-1} 以上。CK 处理耕层土壤 CEC 较低,为 $30 \sim 60 \text{ cm}$ 土层的 59.6%,说明无肥条件下的麦类作物连作对耕层土壤保肥性能的不利影响。各施肥处理耕层、 $30 \sim 60 \text{ cm}$ 土层 CEC 较 CK 处理分别呈不同程度的提高或下降,平均增、减幅度分别达 21.3% 和 32.6%。其中,不同主区间、同一主区内耕层土壤 CEC 与有机质的变化趋势大体一致,反映了有机质对土壤交换性能的重要影响。此外,各施肥处理 CEC 的土体差异亦大幅度缩小,表现出相对均衡的保肥特征。就交换性盐基而言,无肥状态下耕层、 $30 \sim 60 \text{ cm}$ 土层均低于多数施肥处理,维持在较低水平。各主区,特别是高量有机肥 (M_3 主区) 条件下,耕层土壤交换性盐基明显较高,这与施肥对土壤复盐基过程的促进作用有关^[13]。盐基饱和度表征着土壤的肥力状态,尽管多数处理的盐基饱和度呈不同程度的提高,但均小于 50%, M_3 主区耕层土壤亦仅在 30.1% ~ 44.7% 之间。可见,各施肥处理仍处在较低的肥力状态,仅个别处理正处于由低肥力向中等肥力的过渡阶段。一般而言,石灰性土壤的盐基呈饱和或基本饱和状态,试验条件下的这一现象尚待进一步研究、证实。

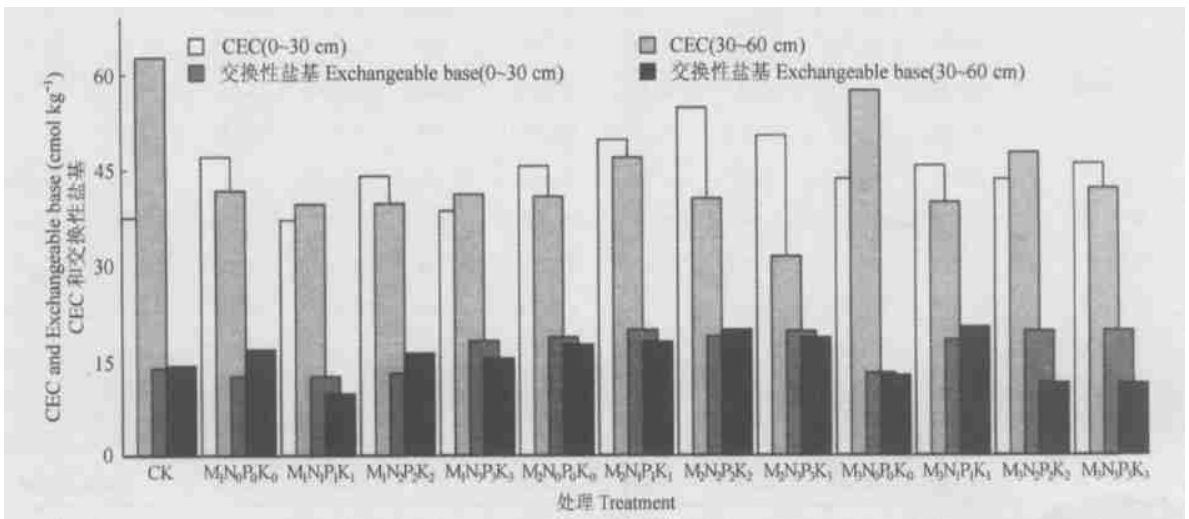


图 3 西藏中部退化农田土壤 CEC 和交换性盐基总量变化特征

Fig. 3 Changes in CEC and exchangeable base content in the degraded farmland soil in Central Tibet

2.4 土壤微生物的变化

不同类群微生物,尤其是细菌在土体中的分布

具有明显的层次性,主要集中于耕层土壤,这对促进耕层土壤有机残体分解和潜在养分转化,提高土壤

供肥能力具有重要作用。土壤微生物区系及其数量分布直接而敏感地反映着土壤的生物活性和土壤环境的质量变化。表3可见,不同土层细菌在微生物区系构成中均占绝对比重,其与真菌、放线菌的数量差异远高于一般土壤^[12],这是试验条件下微生物区系构成中的一个极为重要的特征,体现了土壤微生物过程中的细菌主导地位。有关研究表明,土壤微生物数量与生物量之间存在着相似甚至高度相关的变化趋势^[13]。在不同类群微生物数量差异悬殊的条件下,这种趋势可能更加明显。2~30、30~60 cm 土层细菌与有机质的高度相关(r 值分别为 0.7194^{**} 、 0.6042^{*})即反映了其对土壤过程的深刻影响。表3所示,各施肥处理对促进土壤,特别是耕层土壤细菌繁殖具有极为显著的作用,而不同主区间、同一主区内土壤细菌数量亦具很大差异,并在总体上随有机肥或化肥的递增而趋于增加,这对土壤有机残体的腐解和有机质的形成具有重要作用。

耕层,特别是30~60 cm 土层真菌数量明显低

于CK。B/F值反映着土壤细菌、真菌数量的相对比率,各施肥处理B/F值均达极高水平(耕层土壤在 $12.9 \times 10^4 \sim 122.8 \times 10^4$),这对土壤有机物降解和土壤团聚体的形成极为不利,表明土壤环境尚处于相对较差的状态,微生物类群的均衡性亦需极大的提高。土壤放线菌的变化较为复杂,耕层土壤放线菌具有较为明显的增殖效应,30~60 cm 土层则均呈不同程度的下降。总体而言,施肥对不同土层真菌、30~60 cm 土层放线菌的不利影响均随有机肥递增而趋于减小。

各施肥处理不同土层固氮菌、纤维素分解菌在土壤细菌构成中所占比例均很小,并普遍低于CK处理。耕层土壤固氮菌普遍低于30~60 cm 土层,以及耕层土壤固氮菌(x)与纤维素分解菌(y)一定程度的负相关($r = -0.4799$, $y = 50.9677 - 1.2247x$)是否与耕层土壤有效氮水平的提高对土壤自生固氮的抑制作用有关^[21]尚待进一步研究。

表3 西藏中部退化农田土壤不同土层微生物区系及主要生理类群

Table 3 Microflora and main physiological groups in the degraded farmland soil (2~60 cm soil layer) in Central Tibet

处理 Treatment	细菌 ^① ($\times 10^8 \text{ g}^{-1}$)		真菌 ^② ($\times 10^3 \text{ g}^{-1}$)		放线菌 ^③ ($\times 10^5 \text{ g}^{-1}$)		固氮菌 ^④ ($\times 10^2 \text{ g}^{-1}$)		纤维素分解菌 ^⑤ ($\times 10^2 \text{ g}^{-1}$)	
	2~ 30 cm	30~ 60 cm	2~ 30 cm	30~ 60 cm	2~ 30 cm	30~ 60 cm	2~ 30 cm	30~ 60 cm	2~ 30 cm	30~ 60 cm
	CK	24.683	19.713	19.073	16.088	41.360	49.770	12.712	40.788	26.175
M ₁ N ₀ P ₀ K ₀	49.796	25.315	20.745	6.700	51.241	18.984	17.734	36.482	44.896	8.934
M ₁ N ₁ P ₁ K ₁	56.837	19.334	6.360	7.199	48.780	47.215	—	35.530	57.958	42.079
M ₁ N ₂ P ₂ K ₂	69.125	30.381	10.347	6.751	53.135	19.345	20.328	24.001	59.521	11.624
M ₁ N ₃ P ₃ K ₃	86.823	19.768	9.891	6.269	49.998	47.175	9.891	76.650	16.485	10.315
M ₂ N ₀ P ₀ K ₀	78.641	50.035	6.046	10.856	35.462	48.845	23.060	53.910	20.043	33.360
M ₂ N ₁ P ₁ K ₁	118.097	46.411	22.963	5.706	86.386	48.807	9.109	53.258	13.483	37.658
M ₂ N ₂ P ₂ K ₂	87.975	26.487	32.507	4.916	50.760	11.732	4.211	9.083	86.059	17.230
M ₂ N ₃ P ₃ K ₃	142.162	55.060	19.940	14.316	47.275	36.890	25.479	28.995	17.671	14.316
M ₃ N ₀ P ₀ K ₀	99.283	25.849	24.633	13.151	49.267	38.690	11.947	14.278	12.317	9.771
M ₃ N ₁ P ₁ K ₁	97.384	36.244	14.721	10.578	49.640	48.556	1.132	52.475	52.848	54.399
M ₃ N ₂ P ₂ K ₂	95.493	11.652	18.492	7.324	48.356	46.859	26.418	52.256	12.082	10.246
M ₃ N ₃ P ₃ K ₃	173.816	32.486	14.147	7.739	47.644	19.337	31.264	29.783	13.399	5.801

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

3 土壤肥力的演变、预测及其重建

不同培肥措施由于直接影响着农田生态系统的

养分循环与平衡,进而影响并决定着土壤肥力的演变。因此,通过农田养分平衡与土壤养分变化间的相互关系预测土壤肥力的演变趋势,有助于从宏观上观察土壤肥力的时空变化和可能存在的问

题^[14, 15]。农田土壤养分平衡的实质即是养分的作物消耗和养分投入间的平衡^[14]。表 4 反映了有机肥、有机—无机肥条件下裸大麦 3 年连作对土壤养分平衡的影响。统计分析表明, 耕层土壤全氮、有效磷、有效钾年均变化量(x)与土壤氮、磷、钾的年均平衡量(y)间均存在着不同程度的正相关, 其相关系数分别为 0.359 1 ($Y_N = 4.159 2 + 42.977 3 X_N$)、0.291 7 ($Y_P = 36.993 1 + 3.395 2 X_P$)和 0.190 5 ($Y_K = 4.422 3 + 0.5430 X_K$)。可见, 土壤养分的平衡量与其变化量呈大体一致的趋势。需要说明的是, 由于试验过程不存在养分的径流损失, 且不同有机—无机肥条件下养分的淋溶量极低, 因此土壤养分年均变化量与年均平衡量间不甚显著的相关性可能在于仅仅考虑了肥料投入和作物吸收, 而未考虑石灰性土壤以及黏土矿物对氨挥发、反硝化作用以

及对铵态氮、磷和钾的土壤固定等的影响。

土壤有机质平衡是一个长期的过程。就西藏高原而言, 各施肥处理耕层土壤有机质含量尚属较低水平^[10]。供试土壤具有很高的有效磷基础含量^[16], 各施肥处理 30~60 cm 土层, 尤其是耕层有效磷含量远高于石灰性土壤的高量 ($> 10 \text{ mg kg}^{-1}$) 标准; 全氮水平极低, 仅分别为西藏和全国农田土壤平均水平的 53.9% 和 76.9%^[5, 10]; 土壤全钾量略高于我国全钾谷值区的广西砖红壤 (3.6 g kg^{-1}) 地区^[17], 距西藏山地灌丛草原土平均值 (22.0 g kg^{-1}) 相差甚远, 土壤有效钾含量则均明显低于 50 mg kg^{-1} 的极度缺钾临界水平^[5, 10]。因此, 在持续、稳定的较高有机肥投入量基础上, 增施氮肥、适施磷肥、重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作用。

表 4 西藏中部退化农田土壤在不同培肥方式下的土壤养分平衡¹⁾

Table 4 Soil nutrient balance in degraded farmland soil under different fertilization patterns in Central Tibet

处理 Treatment	养分平衡 Nutrient balance (%)		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
M ₁ N ₀ P ₀ K ₀	-49.5	69.0	-79.1
M ₁ N ₁ P ₁ K ₁	-1.5	133.6	-36.2
M ₁ N ₂ P ₂ K ₂	-3.6	121.0	-27.7
M ₁ N ₃ P ₃ K ₃	5.6	133.9	-18.2
M ₂ N ₀ P ₀ K ₀	-16.9	178.7	-65.6
M ₂ N ₁ P ₁ K ₁	29.8	247.8	-25.5
M ₂ N ₂ P ₂ K ₂	32.6	245.0	-13.7
M ₂ N ₃ P ₃ K ₃	36.3	244.1	-7.7
M ₃ N ₀ P ₀ K ₀	17.4	293.5	-51.3
M ₃ N ₁ P ₁ K ₁	58.3	349.7	-15.1
M ₃ N ₂ P ₂ K ₂	62.4	350.4	-2.9
M ₃ N ₃ P ₃ K ₃	56.4	321.9	-2.8

1) 养分平衡 (%) = (投入/支出 - 1) × 100 Nutrient balance (%) = (input/output - 1) × 100; 养分投入包括肥料和种子所含养分, 降水、灌溉水、生物固氮等所含养分未计; 养分输出仅为作物地上部(籽粒、秸秆、叶片)所含养分量, 养分淋失、挥发等未计 Input includes fertilizer, nutrients in the seeds, rainfall and irrigation; Output includes nutrients in the grains, straw and leaf removed

4 结 论

西藏高原中部生态条件下, 处于无肥状态下的土壤有机质以及耕层全氮、全磷及有效磷较试前下降不甚明显, 全钾、有效钾则呈显著降低, 反映了供试土壤养分下降过程中所具有的相对不平衡性。有机肥、有机—无机肥条件下, 土壤化学和生物学肥力呈现出相对一致性的进化特征, 突出地表现在耕层

土壤有机质、全氮、全磷及有效磷相对较高的积累速率, 腐殖质结构的明显改善、盐基饱和度的较大提高, 以及土壤细菌的显著增殖等方面。有机—无机肥对土壤肥力相对显著的促进作用, 主要在于化肥对以细菌为主导的土壤微生物营养环境的协调与改善作用, 亦即对各类土壤有机残体(包括根茬)的分解所起的激发效应。但总体而言, 退化土壤的肥力恢复仍属于较低水平, 仅个别处理正处在由低肥力向中等肥力的过渡阶段。土壤有机质、腐殖质、全

氮,特别是有效钾状况远未达到正常土壤的肥力水平及其要求;土壤微生物区系极不协调,适于真菌、放线菌、固氮菌、纤维素分解菌正常生长、繁殖的稳定的土壤环境亦远未形成,有利于良好土壤肥力形成的土壤生物环境基础尚待极大地改善和强化。土壤养分的年均平衡量与其年均变化量间不同程度的正相关,基本反映了试验条件下土壤所具有的肥力演变趋势,这对进一步科学地调整养分投入、协调土壤环境、恢复与重建土壤肥力具有重要意义。

参考文献

- [1] 赵其国. 发展与创新现代土壤科学. 土壤学报, 2003, 40(3): 321~ 327. Zhao Q G. Development and innovation of modern soil science (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(3): 321~ 327
- [2] Koolhaan P. The challenges of soil science and sustainable development In: Introductory Conferences and Debate of 16th World Soil Congress. Montpellier, France: ISSS, 1998. 165~ 168
- [3] 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. Zhang T L, Wang X X. Development and orientation of research work on soil degradation (In Chinese). Journal of Natural Resources, 2000, 15(3): 280~ 284
- [4] Whitney D, Stone L, Janssen K, *et al.* Comparative effects nitrogen sources on soil chemical and physical characteristics. Soil Sci. Soc. Am. J., 1991, 55: 1 097~ 1 099
- [5] 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. Lin X X. Chinese situation and management of soil organic matter. In: Shen S M. ed. Chinese Soil Fertility (In Chinese). Beijing: Chinese Agricultural Press, 1998. 111~ 154
- [6] 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. 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 (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2000, 6(1): 3~ 9
- [7] 章明奎. 金衢盆地退化红砂土在不同利用方式下肥力逆转特征. 山地学报, 2000, 18(2): 161~ 165. Zhang M K. Soil fertility restoration characteristics of degraded red sandstone soils in the Jinqu basin under different land use systems (In Chinese). Journal of Mountain Science, 2000, 18(2): 161~ 165
- [8] 张世熔, 黄元仿, 李保国, 等. 黄淮海冲击平原区土壤有机质时空变异特征. 生态学报, 2002, 22(12): 2 041~ 2 047. Zhang S R, Huang Y F, Li B G, *et al.* The temporal and spatial variability of soil organic matter contents in the alluvial region of Huang-Huai-Hai plain, China (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(12): 2 041~ 2 047
- [9] 牛灵安, 郝晋珉, 李吉进. 盐渍土熟化过程中腐殖质特性的研究. 土壤学报, 2001, 38(1): 114~ 122. Niu L A, Hao J M, Li J J. Characteristics of humus in maturing salt-affected soil (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2001, 38(1): 114~ 122
- [10] 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. 192~ 210, 435~ 521. Land Administrative Office of Tibet. Tibet Soil Resource (In Chinese). Beijing: Science Press, 1994. 192~ 210, 435~ 521
- [11] 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(2): 233~ 238. Zhang Q Z, Chen X, Shen S M. Advances in studies on accumulation and leaching of nitrate in farming soil (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(2): 233~ 238
- [12] 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. Chen W X. Soil and Environmental Microecology (In Chinese). Beijing: Beijing Agricultural University Press, 1990. 19~ 35, 73~ 194
- [13] 孙波, 张桃林, 赵其国. 我国中亚热带缓丘区红粘土土壤肥力的演化 II. 化学和生物学肥力的演化. 土壤学报, 1999, 36(2): 203~ 217. 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 II. Evolution of soil chemical and biological fertilities (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1999, 36(2): 203~ 217
- [14] 鲁如坤, 时正元, 施建平. 我国南方 6 省农田养分平衡现状评价和动态变化研究. 中国农业科学, 2000, 33(2): 63~ 67. Lu R K, Shi Z Y, Shi J P. Nutrient balance of agroecosystem in six provinces in Southern China (In Chinese). Scientia Agricultura Sinica, 2000, 33(2): 63~ 67
- [15] 孙波, 王兴祥, 张桃林. 丘陵红壤耕作利用过程中土壤肥力的演变和预测. 土壤学报, 2002, 39(6): 836~ 843. Sun B, Wang X X, Zhang T L. Changes of red soil fertility and its prediction during the land-use and cultivation in low hill region (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(6): 836~ 843
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000. 80~ 81. Bao S D. Soil Agrochemistry Analysis (In Chinese). Beijing: Chinese Agricultural Press, 2000. 80~ 81
- [17] 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. Lu R K. Principle and Apply Fertilizer of Soil-Plant Nutrition (In Chinese). Beijing: Chemical Industry Press, 1998. 120~ 165

FERTILITY AND RESTORATION OF DEGRADED SOIL IN CENTRAL TIBET

Cai Xiaobu Qian Cheng Peng Yuelin Dan Ba

(*Department of Agriculture, Tibet Agricultural and Animal Husbandry College, Linzhi, Tibet 860000, China*)

Abstract Field experiments were carried out to investigate effects of combined application of organic manure and inorganic fertilizer on chemical and biological characteristics of the degraded soil and soil fertility restoration in Central Tibet. The results showed that changes in chemical or biological characteristics of the degraded soil were quite similar among different treatments, i. e. a declining trend for organic matter, total N and total P in the plough layer, but total K and available K in different depths of the soil profile dropped significantly in the non-fertilization treatment. Processes of soil fertility restoration were not affected in the organic manure treatment. Combined application of organic manure and inorganic fertilizer had a significant and prompt effect on harmonizing the soil environment, promoting the process of bacteria-dominated propagation of soil microorganism, enhancing the accumulation of soil organic matter and improving the structure of humic compounds, and increasing the pool of N, P and CEC, exchangeable bases as compared with the treatment of non-fertilization. Although K was applied to the soil, K deficiency was still quite obvious in all treatments. The annual changes in soil total N, available P and available K were correlated with the annual balance of N, P and K to a varying extent, and the changes in soil nutrient contents coincided with that in nutrient balance. On the basis of continuous application of organic manure, application of an increased rate of nitrogenous fertilizer, an appropriate rate of phosphates fertilizer and a high rate of potassium fertilizer had an important promoting effect on fertility restoration of the degraded soil.

Key words Soil degradation; Fertilization; Changes in soil fertility; Tibet