

# 石灰性土壤微生物量碳、氮与土壤颗粒组成和氮矿化势的关系\*

金发会<sup>1,2</sup> 李世清<sup>1,2\*</sup> 卢红玲<sup>1</sup> 李生秀<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

**摘要** 以黄土高原土壤类型和土壤肥力差异较大的 25个农田石灰性耕层土壤为供试土样,研究了土壤微生物量碳(B<sub>C</sub>)、微生物量氮(B<sub>N</sub>)与土壤氮素矿化势(N<sub>0</sub>)、全氮(TN)、有机碳(OC)及土壤颗粒组成的关系.结果表明: B<sub>C</sub>、B<sub>N</sub>与 TN、OC呈极显著正相关(P < 0.01),表明 B<sub>C</sub>、B<sub>N</sub>与土壤肥力关系密切,可作为评价土壤质量的生物学指标. B<sub>C</sub>、B<sub>N</sub>与 N<sub>0</sub>均呈高度正相关,相关系数分别为 0.1665和 0.1741(P < 0.01). B<sub>C</sub>、B<sub>N</sub>、TN、OC、N<sub>0</sub>与土壤物理性粘粒(< 0.01 mm)呈显著或极显著正相关,而与物理性砂粒(> 0.01 mm)呈显著或极显著负相关,与物理性粘粒和砂粒比值呈显著或极显著正相关,表明土壤有机质主要通过土壤物理性粘粒复合而形成有机无机复合体.

**关键词** 微生物量碳 微生物量氮 氮素矿化势 土壤颗粒组成

**文章编号** 1001-9332(2007)12-2739-08 **中图分类号** S159.12 **文献标识码** A

Relationships of microbial biomass carbon and nitrogen with particle composition and nitrogen mineralization potential in calcareous soil JN Fa2hui<sup>1,2</sup>, LI Sh2qing<sup>1,2</sup>, LU Hong2ling<sup>1</sup>, LI Sheng2xiu<sup>2</sup> (<sup>1</sup>State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A& F University/Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resource, Yangling 712100, Shaanxi, China; <sup>2</sup>College of Resources and Environmental Sciences, Northwest A& F University, Yangling 712100, Shaanxi, China). *Chin. J. Appl. Ecol.*, 2007, 18(12): 2739-2746

**Abstract** Taking 25 surface soil samples of calcareous soil with greater difference in fertility on Loess Plateau as test materials, this paper studied the relationships of soil microbial biomass carbon (B<sub>C</sub>) and nitrogen (B<sub>N</sub>) with soil nitrogen mineralization potential (N<sub>0</sub>), total nitrogen (TN), organic carbon (OC), and particle composition. The results showed that B<sub>C</sub> and B<sub>N</sub> had significant positive correlations with TN and OC, suggesting that B<sub>C</sub> and B<sub>N</sub> were highly related with soil fertility and could be used as biological indices of soil quality. B<sub>C</sub> and B<sub>N</sub> were highly correlated with N<sub>0</sub>, with the correlation coefficient being 0.1741 and 0.1665, respectively (P < 0.01). B<sub>C</sub>, B<sub>N</sub>, TN, OC and N<sub>0</sub> all had significant positive correlations with physical clay (< 0.01 mm) but negative correlations with physical sand (> 0.01 mm), and had significant positive correlations with the ratio of physical clay to physical sand, indicating that soil organic matter was mainly combined with physical clay to form soil organic-mineral complexes.

**Key words** microbial biomass carbon, microbial biomass nitrogen, nitrogen mineralization potential, soil particle composition.

\* 国家自然科学基金项目(90502006, 30571116)和西北农林科技大学创新团队资助项目.

\*\* 通讯作者. E-mail: sqli@ms.iswc.ac.cn

2006210231收稿, 200709215接受.

## 1 引言

土壤微生物是土壤有机质和土壤养分转化和循环的动力,直接参与土壤有机质分解、腐殖质形成、土壤养分转化和循环等过程.研究表明,虽然土壤微生物量碳( $B_C$ )占土壤有机碳(OC)的比例很小,但其在OC的活性部分,可反映土壤有效养分状况和生物活性<sup>[10]</sup>.土壤微生物量氮( $B_N$ )是土壤有机氮中最活跃的组成成分,在土壤氮素转化中起着不可忽视的作用<sup>[33]</sup>.近十几年来,国内外对 $B_C$ 、 $B_N$ 进行了大量研究,基本明确了影响 $B_C$ 和 $B_N$ 的各种土壤、环境因子,特别是阐明了 $B_C$ 、 $B_N$ 与土壤养分<sup>[16-17]</sup>、温湿度<sup>[19]</sup>及耕作和栽培措施<sup>[7,28,31]</sup>的相关关系.20世纪50年代以来,人们对土壤供氮能力进行了大量研究,其中以用通气培养法估算氮素矿化势( $N_0$ )的研究较多<sup>[29]</sup>,但也有将 $B_C$ 和 $B_N$ 作为供氮指标的研究<sup>[13-14]</sup>.土壤颗粒组成强烈影响土壤质地组成和土壤结构,必然通过改变微生物活性而影响 $N_0$ 、 $B_C$ 和 $B_N$ .但目前将土壤 $B_C$ 、 $B_N$ 与 $N_0$ 及土壤颗粒组成联系起来的研究较少.本试验研究了黄土高原不同类型石灰性土壤 $B_C$ 、 $B_N$ 与 $N_0$ 及土壤颗粒组成的关系,以期揭示土壤肥力本质提供理论依据.

表1 供试土壤基本情况

Tab 1 Basic status of test soils

样品编号 Sample No	采样地点 Location	作物 Crop	土壤类型 Soil type	样品编号 Sample No	采样地点 Location	作物 Crop	土壤类型 Soil type
1	神木 Shenmu	玉米 Maize	干润砂质新成土 Ust sandic entisols	14	杨凌 Yangling	玉米 Maize	土垫旱耕人为土 Eum orthic antherosols
2	榆林 Yulin	玉米 Maize	干润砂质新成土 Ust sandic entisols	15	杨凌 Yangling	玉米 Maize	土垫旱耕人为土 Eum orthic antherosols
3	绥德 Suide	玉米 Maize	干润砂质新成土 Ust sandic entisols	16	杨凌 Yangling	玉米 Maize	土垫旱耕人为土 Eum orthic antherosols
4	清涧 Qingjian	玉米 Maize	干润砂质新成土 Ust sandic entisols	17	杨凌 Yangling	玉米 Maize	土垫旱耕人为土 Eum orthic antherosols
5	延川 Yanchuan	谷子 Foxta millet	干润砂质新成土 Ust sandic entisols	18	杨凌 Yangling	玉米 Maize	土垫旱耕人为土 Eum orthic antherosols
6	安塞 An sai	玉米 Maize	黄土正常新成土 Los orthic entisols	19	杨凌 Yangling	猕猴桃 Kwifruit	土垫旱耕人为土 Eum orthic antherosols
7	延安 Yan an	玉米 Maize	黄土正常新成土 Los orthic entisols	20	杨凌 Yangling	玉米 Maize	土垫旱耕人为土 Eum orthic antherosols
8	延安 Yan an	玉米 Maize	黄土正常新成土 Los orthic entisols	21	杨凌 Yangling	玉米 Maize	土垫旱耕人为土 Eum orthic antherosols
9	富县 Fuxian	玉米 Maize	黄土正常新成土 Los orthic entisols	22	杨凌 Yangling	黄瓜 Cucumber	土垫旱耕人为土 Eum orthic antherosols
10	洛川 Luochuan	玉米 Maize	筒育干润均腐土 Hap ustic isohumiso b	23	杨凌 Yangling	玉米 Maize	土垫旱耕人为土 Eum orthic antherosols
11	宜君 Yijun	玉米 Maize	筒育干润均腐土 Hap ustic isohumiso b	24	周至 Zhouzhi	玉米 Maize	土垫旱耕人为土 Eum orthic antherosols
12	耀县 Yaoxian	玉米 Maize	筒育干润均腐土 Hap ustic isohumiso b	25	武功 Wugong	玉米 Maize	土垫旱耕人为土 Eum orthic antherosols
13	三原 Sanyuan	玉米 Maize	土垫旱耕人为土 Eum orthic antherosols				

## 2 材料与方法

## 2.1 供试土壤

于2005年6月末至7月初,在黄土高原从北(神木县)至南(关中平原)采集25个农业耕层(0~20 cm)土壤样品(表1).采回土样迅速过6 mm筛,充分混匀,备用.取部分混匀的新鲜土样过2 mm筛,放入冰柜中冷藏保存,用于室内培养试验;取部分土样风干,用于测定土壤基本理化性质.

所采土样包括干润砂质新成土、黄土正常新成土、筒育干润均腐土和土垫旱耕人为土,属黄土高原主要土壤类型<sup>[8]</sup>.供试土壤基本性质差异较大(表2):有机碳含量为4112~14184 g# kg<sup>-1</sup>,全氮含量为0158~1164 g# kg<sup>-1</sup>;pH 610~814平均811?015(除24号土样呈酸性外,其余土样均为石灰性土壤).

## 2.1.2 试验方法

2.1.2.1 土壤基本理化性质测定 有机碳用重铬酸钾容量法(外加热法)测定;全氮用开氏法消解, K2300型全自动定氮仪测定;矿质氮用2 mo# L<sup>-1</sup> KCl浸提,连续流动分析仪测定;有效磷用015 mo# L<sup>-1</sup> NaHCO<sub>3</sub>提取,钼蓝比色法测定(Olsen法);不溶性碳酸盐总量用气量法测定;pH值用电位法(pH计)测定.

表 2 供试土壤的基本理化性质

Tab 2 Basic physicochemical properties of test soils

样品编号 Sample No	有机碳 Organic carbon ( $\text{g kg}^{-1}$ )	全氮 Total nitrogen ( $\text{g kg}^{-1}$ )	C/N	矿质氮 Mineral nitrogen ( $\text{L g}^{-1}$ )	有效磷 Available phosphorus ( $\text{L g}^{-1}$ )	CaCO <sub>3</sub> (%)	pH (H <sub>2</sub> O)
1	61.56	0.82	8.02	811.7	271.1	41.31	8.10
2	81.97	0.94	9.49	431.2	101.6	51.31	8.13
3	41.12	0.50	8.21	581.9	131.0	81.30	8.13
4	51.69	0.67	8.48	401.2	31.5	91.02	8.12
5	41.88	0.68	7.18	431.2	91.6	101.15	8.14
6	71.31	0.82	8.95	271.2	41.9	101.38	8.14
7	61.45	1.02	6.34	491.8	121.1	81.96	8.11
8	71.13	0.80	8.95	431.9	51.2	101.86	8.14
9	121.10	1.02	11.89	881.0	61.6	101.24	8.13
10	61.76	0.82	8.27	201.3	91.6	51.30	8.14
11	41.91	0.81	6.10	271.1	131.9	91.89	8.13
12	41.61	0.58	8.01	231.7	71.9	131.28	8.13
13	141.84	1.64	9.05	331.3	171.0	121.50	8.13
14	121.68	1.47	8.62	381.8	151.1	81.94	8.12
15	81.83	1.17	7.55	211.0	181.0	81.05	8.14
16	121.54	1.44	8.68	261.1	221.7	91.61	8.11
17	61.56	1.26	5.21	251.7	161.4	71.77	8.12
18	101.52	1.33	7.90	331.1	621.4	91.77	8.11
19	101.19	1.23	8.29	391.1	771.4	81.44	8.12
20	91.73	1.12	8.73	271.7	131.2	81.59	8.12
21	121.19	1.52	8.02	371.2	91.4	51.95	8.10
22	91.52	1.58	6.04	1011.7	1901.7	91.50	7.18
23	51.95	1.40	4.26	291.5	161.0	81.35	8.12
24	101.09	1.29	7.82	461.2	121.5	01.29	6.10
25	111.70	1.47	7.95	231.5	221.1	71.44	8.12
平均 Mean	81.59	1.10	7.92	411.2	241.7	81.4	8.11

21212 颗粒分析 称取 2100 g 过 1 mm 筛的干土,加水湿润浸泡过夜后在电炉上煮沸,加 0% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消除有机质(用异戊醇消泡),处理完毕后用 Mastersizer 2000 型激光粒度分析仪(英国 Malvern 公司生产)测定土壤不同粒级颗粒组成。

21213 微生物量碳和微生物量氮 B<sub>c</sub> 用熏蒸提取法测定<sup>[20]</sup>。称取 20100 g 鲜土放入 100 ml 塑料瓶中,在 50% 湿度下预培养 7 d 培养时同时放入一烧杯清水及一烧杯浓度为 1 mol# L<sup>-1</sup> 的 NaOH 溶液,以保持湿度和吸收释放的 CO<sub>2</sub>。预培养结束后,将装有土样的塑料瓶与盛有 60 ml 左右无酒精氯仿的小烧杯(内放少量抗暴沸物质)一起放入真空干燥器内,用真空泵抽至真空,使氯仿沸腾 5 min 后关闭真空干燥器阀门,将真空干燥器放入 25 e 黑暗培养箱中熏蒸 24 h,以不用氯仿熏蒸处理的土样为对照。熏蒸结束后,取出氯仿,用真空泵反复抽气,直到土壤闻不到氯仿味后,用 015 mol# L<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液浸提,提取液中的有机碳(TOC)用 Phoenix28000 型总有机碳分析仪(美国 TekmarDhmann 公司生产)测定。

B<sub>c</sub> 计算公式为<sup>[30]</sup>:  $B_c = 2164 @(\text{熏蒸土样 TOC} - \text{对照土样 TOC})$ 。式中,2164 为 B<sub>c</sub> 的换算系数。

B<sub>N</sub> 也用熏蒸提取法测定<sup>[51]</sup>。土壤预培养、氯仿熏蒸处理和溶液浸提方法同 B<sub>c</sub> 测定。取测定 B<sub>N</sub> 时的提取液 10 ml 于 50 ml 三角瓶中,加入 0122 ml 0119 mol# L<sup>-1</sup> 的 CuSO<sub>4</sub> 溶液和 2 ml 浓硫酸,在电热板上用沙浴加热消化,当三角瓶中溶液沸腾变成无色后,计时再加热 115 h 后取出,将消化液转移至 50 ml 容量瓶中定容,用流动分析仪测定溶液中的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> N 浓度。B<sub>N</sub> 计算公式为<sup>[11]</sup>:  $B_N = 1185 F_N$ 。式中:1185 为 B<sub>N</sub> 的转化系数;F<sub>N</sub> 为熏蒸与未熏蒸土壤 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 提取液液中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> N 浓度的差值。

21214 土壤氮素矿化势(N<sub>0</sub>) 采用 Stanford 等<sup>[29]</sup>的方法测定。称取 15100 g 鲜土与等量石英砂(2 mm < d < 3 mm)混合后,加入少量蒸馏水,搅拌使其形成粘结良好的土砂混合物,装入 50 ml 培养管内,培养管预先装入 10 g 石英砂,上垫一层玻璃纤维。土砂混合物加入后,轻振几下,再在上面盖一层玻璃纤维和石英砂,以防淋洗对土壤的冲溅。用 100 ml 0101 mol# L<sup>-1</sup> CaCl<sub>2</sub> 以 5~10 ml 增量淋洗土壤中的起始矿质氮,然后加入 25 ml 无氮营养液(01002 mol# L<sup>-1</sup> CaSO<sub>4</sub># 2H<sub>2</sub>O, 01002 mol# L<sup>-1</sup> MgSO<sub>4</sub># 7H<sub>2</sub>O, 01005 mol# L<sup>-1</sup> Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub># H<sub>2</sub>O 和 010025 mol# L<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 的混合液),多余水分在 80 kPa 负压下抽出。将培养管口用塑料膜密封,扎一小孔,保持试管内通气良好,再将装有土砂混合介质的培养管置于(35±1)e 恒温培养箱中培养。分别在培养到第 2、4、8、12、16、22 和 30 周时,用 100 ml 0101 mol# L<sup>-1</sup> CaCl<sub>2</sub> 溶液淋洗移去培养期间土壤产生的矿质氮、加入无氮营养液和抽去多余水分等。每次淋洗液用 100 ml 容量瓶接收,定容后用连续流动分析仪测定其中的矿质氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup> N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> N)浓度。

N<sub>0</sub> 和土壤氮素矿化速率常数(k)根据 Stanford 等<sup>[4,29]</sup>提出的方法确定。N<sub>0</sub> 是指在一定条件下土壤可矿化的最大有机氮量或有机氮矿化所产生的最大矿质氮量。k 是矿化快慢的标志,单位为 w<sup>-1</sup>。

### 213 数据分析

采用 Excel 软件对数据进行相关分析。

## 3 结果与分析

311 土壤微生物量碳、微生物量氮与全氮和有机碳的关系

由表 3 可知, B<sub>c</sub> 含量变化在 241.8~442.4 mg#

$\text{kg}^{-1}$ 之间,占 OC含量的 015% ~ 51%;  $B_N$  含量变化在 814~ 6119  $\text{mg} \# \text{kg}^{-1}$ 之间,占 TN含量的 11% ~ 61%。  $B_C$  和  $B_N$  虽然只占 OC 和 TN 的很少一部分,但它们却是活的土壤有机碳和有机氮部分。土壤微生物量碳氮比值 ( $B_C/B_N$ ) 在 018~ 816 之间,土壤 C/N 在 5121~ 11189 之间。

相关分析表明(表 4),  $B_C$  和  $B_N$  呈高度正相关 ( $r=01864 P < 0101$ );  $B_C$ 、 $B_N$  分别与 TN、OC 也呈极显著正相关,相关系数在 01519 以上 ( $P < 0101$ ), 表明  $B_C$ 、 $B_N$  与土壤肥力关系密切,可作为评价土壤质

量的生物学指标。  $B_C/OC$  与 TN、OC 的相关性较差,但与  $B_C$  和  $B_N$  的相关性较高,相关系数分别为 01693 和 01641 ( $P < 0101$ );  $B_N/TN$  与 TN、 $B_C$  和  $B_N$  的相关性较低,均未达显著水平。

312 微生物量碳、氮与土壤氮素矿化势和氮素矿化速率常数的关系

相关分析表明(表 4),  $N_0$  与 TN、OC 密切相关,相关系数分别为 01672 和 01659 ( $P < 0101$ ), 说明  $N_0$  也可作为土壤肥力状况指标,特别是土壤潜在供氮能力指标。  $B_C$ 、 $B_N$  与  $N_0$  呈高度相关,相关系数分

表 3 土壤微生物量碳、氮和土壤氮素矿化势及矿化速率常数

Tab 3 Microbial biomass carbon, microbial biomass nitrogen, nitrogen mineralization potential and nitrogen mineralization rate constant of test soils

样品编号 Sample No	$B_C$ ( $\text{Lg} \# \text{g}^{-1}$ )	$B_N$ ( $\text{Lg} \# \text{g}^{-1}$ )	$B_C/B_N$	$B_C/OC$	$B_N/TN$	$N_0$ ( $\text{Lg} \# \text{g}^{-1}$ )	$N_0/TN$	矿化速率常数 Mineralization rate constant (mean $\pm$ SD)
1	18513	2212	813	01028	01027	270	01330	01025? $\pm$ 01006
2	14111	3213	414	01016	01034	180	01191	01025? $\pm$ 01006
3	12213	3014	410	01030	01061	180	01358	01008? $\pm$ 01001
4	15314	3816	410	01027	01058	185	01276	01014? $\pm$ 01001
5	2418	2913	018	01005	01043	150	01221	01024? $\pm$ 01006
6	16813	3619	416	01023	01045	140	01171	01029? $\pm$ 01004
7	16216	2216	712	01025	01022	140	01138	01032? $\pm$ 01003
8	14911	2512	519	01021	01032	140	01176	01039? $\pm$ 01003
9	16618	1913	816	01014	01019	230	01226	01024? $\pm$ 01003
10	15110	2513	610	01022	01031	110	01135	01033? $\pm$ 01004
11	6310	814	715	01013	01010	55	01068	01047? $\pm$ 01016
12	11113	2712	411	01024	01047	60	01104	01051? $\pm$ 01009
13	44214	5918	714	01030	01036	290	01177	01041? $\pm$ 01006
14	41313	6119	617	01033	01042	285	01194	01040? $\pm$ 01012
15	16712	3119	512	01019	01027	160	01137	01038? $\pm$ 01008
16	29816	4213	711	01024	01029	240	01166	01043? $\pm$ 01009
17	36411	5613	615	01055	01045	250	01199	01038? $\pm$ 01009
18	31710	4310	714	01030	01032	180	01135	01045? $\pm$ 01009
19	20314	3314	611	01020	01027	220	01179	01031? $\pm$ 01010
20	29311	3913	715	01030	01035	175	01157	01050? $\pm$ 01009
21	38316	4416	816	01031	01029	235	01155	01029? $\pm$ 01002
22	31814	3812	813	01033	01024	270	01171	01045? $\pm$ 01010
23	33211	4619	711	01056	01034	190	01136	01042? $\pm$ 01010
24	13414	2611	511	01013	01020	160	01124	01035? $\pm$ 01005
25	29912	4516	616	01026	01031	240	01163	01032? $\pm$ 01003
平均 Mean	22216	3515	613	01026	01034	189	01179	01034? $\pm$ 01007

表 4 土壤微生物量碳、氮与全氮、有机碳、氮素矿化势间的相关系数 ( $r$ )

Tab 4 Correlation coefficients ( $r$ ) between microbial biomass carbon, microbial biomass nitrogen with total nitrogen, organic carbon and nitrogen mineralization potential of test soils

指标 Index	$N_{min}$	TN	OC	$B_C$	$N_0$	k	$B_C/OC$	$B_N/TN$
$B_C$	- 01081	01846	01683	-	01741	01364	01693	01022
$B_N$	- 01272	01661	01519	01864	01665	01181	01641	01414
$N_0$	01388	01672	01659	-	-	- 01133	01408	01036
TN	- 01020	-	01803	-	-	01438	01397	- 01371

$n=25$   $r_{0.05}=01369$   $r_{0.01}=01505$ .

别为 01741 和 01665 ( $P < 0101$ ).  $B_c/OC$  随  $N_0$  增加而提高, 与  $N_0$  呈显著正相关, 相关系数为 01408 ( $P < 0105$ ), 说明  $B_c/OC$  在一定程度上也可反映土壤肥力水平.  $B_N/TN$  与  $N_0$  相关性较差.

供试土壤  $k$  值变化范围较小, 在 01008~01051  $w^{-1}$  之间, 平均为 (01034 ? 01007)  $w^{-1}$ .  $k$  与  $B_c$  和  $B_N$  间无显著相关性, 相关系数分别仅为 01364 和 01181, 均未达显著水平.

### 313 土壤微生物量碳、氮与颗粒组成的关系

土壤颗粒分析结果表明 (表 5),  $< 01001$  mm 的土壤颗粒仅占 7%; 粒级在 01001~01002 mm、01002~01005 mm 和 01005~0101 mm 的颗粒分别占 9%、16% 和 15%; 粒级在 0101~0105 mm 的颗粒占绝对优势, 占 44%; 粒级在 0105~011 mm 和 011~0125 mm 的颗粒分别占 7% 和 1%; 而  $> 0125$  mm (0125~110 mm) 的颗粒不到 1%. 供试土壤平均物理性粘粒占 4619%, 物理性砂粒占 5219%, 各土样物理性粘粒和物理性砂粒的比值 ( $< 0101$  mm /  $> 0101$  mm) 在 019 左右, 说明黄土高原土壤物理性粘

粒与物理性砂粒所占比例比较稳定.

相关分析表明 (表 6), 粒级  $< 01001$  mm 的土壤颗粒与  $TN$ 、 $OC$ 、 $B_c$ 、 $B_N$ 、 $N_0$  和  $k$  值均呈负相关性. 在 01001~01002 mm、01002~01005 mm、01005~0101 mm 粒级范围内的颗粒与各指标均呈显著或极显著正相关, 其中以 01002~01005 mm 与各指标的相关性最高, 可能在这些粒级范围内的土壤颗粒通过与有机质结合而进一步形成有机无机复合体; 粒级在 0101~0105 mm、0105~011 mm 范围的颗粒与各指标大多呈显著或极显著负相关; 粒级在 011~0125 mm 范围的颗粒与各指标相关不明显; 粒级在 0125~015 mm 范围的颗粒与各指标大多呈显著或极显著正相关, 这一粒级范围的颗粒与 01001~0101 mm 范围的颗粒通过有机质连接形成复合体; 粒级在 015~1 mm 范围的颗粒与各指标大多呈弱正相关性.

$< 0101$  mm 的物理性粘粒与各指标均呈显著或极显著正相关,  $> 0101$  mm 的物理性砂粒与各指标均呈显著和极显著负相关. 物理性粘粒和物理性砂

表 5 土壤颗粒组成中各粒径体积百分含量

Tab 5 Volume percentage content of different size of soil particles in soil particle composition (%)

样品编号 Sample No	粒级 Grade (mm)									物理性粘粒 Physical clay (PC) ( $< 0101$ mm)	物理性砂粒 Physical sand (PS) ( $> 0101$ mm)	物理性粘粒 / 物理性砂粒 PC/PS
	$< 01001$	01001~ 01002	01002~ 01005	01005~ 0101	0101~ 0105	0105~ 011	011~ 0125	0125~ 015	015~ 1			
1	41.9	10.0	17.0	15.5	41.3	7.6	2.0	0.4	1.0	47.4	52.3	0.91
2	12.1	9.8	15.2	11.9	37.7	10.1	2.2	0.3	0.6	49.0	50.9	0.96
3	7.9	8.1	13.9	14.0	45.3	9.2	1.1	0.0	0.3	43.9	56.0	0.79
4	10.6	6.1	10.9	11.5	46.5	12.9	1.3	0.1	0.2	39.0	60.9	0.64
5	7.3	5.5	9.2	10.2	50.1	16.0	1.8	0.0	0.0	32.1	67.9	0.47
6	8.0	5.7	10.1	10.5	46.7	16.8	2.1	0.0	0.0	34.3	65.7	0.52
7	7.4	7.4	13.5	13.5	47.0	9.3	1.0	0.1	0.2	41.9	57.7	0.73
8	9.8	5.2	9.5	10.5	50.7	13.0	1.2	0.0	0.0	35.1	64.9	0.54
9	11.3	6.5	10.9	11.1	47.9	11.3	1.0	0.0	0.0	39.8	60.2	0.66
10	12.4	7.0	11.9	11.7	46.5	9.4	0.9	0.0	0.1	43.0	56.9	0.76
11	4.6	8.0	15.2	15.5	49.3	6.2	0.6	0.1	0.2	43.4	56.4	0.77
12	5.1	8.1	15.0	15.5	49.0	5.6	0.8	0.2	0.3	43.7	55.8	0.78
13	5.3	10.3	20.0	18.6	38.8	4.1	1.3	0.6	0.8	54.3	45.5	1.19
14	4.8	10.2	19.9	17.5	40.8	4.5	1.2	0.6	0.4	52.4	47.5	1.10
15	8.2	8.5	16.0	16.3	38.4	6.5	4.3	1.1	0.5	48.9	50.7	0.96
16	5.7	10.8	20.5	18.0	38.5	4.4	1.0	0.4	0.3	55.0	44.7	1.23
17	5.2	9.7	18.0	16.5	42.9	5.3	1.3	0.3	0.4	49.5	50.2	0.99
18	5.2	9.8	18.9	17.5	43.3	4.0	0.8	0.3	0.1	51.3	48.6	1.06
19	4.9	10.0	19.1	17.0	43.1	4.5	0.8	0.2	0.1	50.9	48.7	1.04
20	5.5	10.9	20.8	18.2	39.2	4.1	0.9	0.2	0.0	55.3	44.4	1.25
21	4.9	9.9	19.4	17.3	42.2	4.3	1.2	0.6	0.1	51.6	48.4	1.07
22	5.3	10.4	19.6	17.6	40.7	4.9	1.0	0.2	0.1	52.8	46.9	1.13
23	4.9	10.4	21.0	18.6	40.0	3.6	0.9	0.1	0.0	55.0	44.7	1.23
24	10.2	6.3	14.6	17.7	43.0	5.9	1.6	0.3	0.2	48.8	51.0	0.96
25	4.9	10.3	20.3	17.5	39.4	4.9	1.6	0.6	0.2	53.1	46.7	1.14
平均 Mean	7.1	8.6	16.0	15.2	43.5	7.5	1.4	0.3	0.2	46.9	52.9	0.91

表 6 土壤颗粒组成与土壤微生物量碳、氮、全氮和氮素矿化势的相关系数 (r)

Tab 6 Correlation coefficients (r) between soil particle composition with microbial biomass carbon, microbial biomass nitrogen and total nitrogen, nitrogen mineralization potential of test soils

粒级 Grade(mm)	TN	OC	B <sub>C</sub>	B <sub>N</sub>	N <sub>0</sub>	k
< 0.001	- 0.1446	- 0.1157	- 0.1524	- 0.1407	- 0.1304	- 0.1491
0.001~ 0.002	0.1662	0.1467	0.1725	0.1551	0.1555	0.1397
0.002~ 0.005	0.1779	0.1533	0.1785	0.1603	0.1551	0.1503
0.005~ 0.01	0.1753	0.1480	0.1698	0.1515	0.1433	0.1565
0.01~ 0.05	- 0.1698	- 0.1586	- 0.1650	- 0.1588	- 0.1631	- 0.1191
0.05~ 0.1	- 0.1692	- 0.1452	- 0.1656	- 0.1415	- 0.1358	- 0.1587
0.1~ 0.25	- 0.1036	0.1014	- 0.1180	- 0.1017	0.1047	- 0.1223
0.25~ 0.5	0.1567	0.1524	0.1475	0.1427	0.1415	0.1236
0.5~ 1	0.1094	0.1178	0.1211	0.1199	0.1414	- 0.1081
物理性粘粒 Physical clay (< 0.01 mm)	0.1780	0.1578	0.1748	0.1562	0.1542	0.1453
物理性砂粒 Physical sand (> 0.01 mm)	- 0.1777	- 0.1569	- 0.1743	- 0.1556	- 0.1535	- 0.1459
物理性粘粒 物理性砂粒 Physical clay/physical sand	0.1803	0.1596	0.1771	0.1601	0.1558	0.1475

n = 25 r<sub>0.05</sub> = 0.1369 r<sub>0.01</sub> = 0.1505.

粒比值与各指标均呈显著或极显著正相关, 进一步说明小粒级颗粒 (< 0.101 mm) 与土壤有机质的关系更密切。

#### 4 讨 论

B<sub>N</sub> 在数量上低于或接近作物地上部分吸氮量<sup>[12, 27]</sup>。Jenkinson等<sup>[12]</sup>估计, 不施肥连续种植小麦的土壤 B<sub>N</sub> 为 95 kg N# hm<sup>-2</sup>, 每年经微生物转化的氮通量达 38 kg# hm<sup>-2</sup>; Clark<sup>[6]</sup>发现, 在矮草原上, 通过微生物向植物根系转移的氮素占植物地上部分需氮量的 33%; Smith等<sup>[27]</sup>指出, 冬小麦地上部分吸氮量的 47% 来自于 B<sub>N</sub>。可见, B<sub>N</sub> 不仅是土壤氮素转化中易变动的重要组成部分, 也是植物营养的主要氮库。一般认为, B<sub>N</sub> 半生命期为 0.5年, 而土壤有机质在 22年以上, B<sub>N</sub> 占土壤氮素矿化势的 30% 以上<sup>[24]</sup>。B<sub>N</sub> 对土壤温度、湿度等环境因子和耕作、施肥等管理措施非常敏感<sup>[7, 12, 31]</sup>, 是易变动的源和库<sup>[26-27]</sup>。

已有研究表明, B<sub>C</sub>、B<sub>N</sub> 与有机质之间的依赖关系是一条最为普遍的规律<sup>[2, 18]</sup>, 本研究也证实了这一点(表 4)。本研究中, 在利用土壤微生物量进行土壤肥力评价时, B<sub>C</sub> 与 OC、TN 的相关性优于 B<sub>N</sub>, 说明 B<sub>C</sub> 作为评价土壤肥力的指标可能较 B<sub>N</sub> 更灵敏<sup>[32]</sup>。B<sub>C</sub> 主要与土壤有机质含量相关, 但同时也受施肥、栽培和气候等因素的影响, 因此即使土壤有机质等基本性质相近的同类土壤间, B<sub>C</sub> 也会存在较大差异, 如本研究中 5号土壤样品的 B<sub>C</sub> 显著低于其它同类土壤。

土壤 C/N 是土壤氮素矿化微生物固定转化能力的标志, C/N 值低表明土壤有机氮易发生净矿

化, 并且具有较高的矿化速率, 将导致土壤矿质氮增加; C/N 值过高则表明微生物将对土壤矿质氮发生净固定, 同时微生物与植物对土壤矿质氮发生竞争。一般认为, 标志矿化还是固定的 C/N 临界值为 25。死亡微生物躯体较低的 C/N 使其中的有机氮很容易被矿化, 因此微生物既可参与和促进土壤氮素矿化, 提供有效氮源, 同时其本身又是有效氮的重要储备库<sup>[15]</sup>。本研究中, 土壤微生物量碳氮比值 (B<sub>C</sub> / B<sub>N</sub>) 在 0.18 ~ 8.16 范围内, 较土壤 C/N (5.121 ~ 11.189) 低。土壤 C/N 越大, 说明有机物质越不易被矿化, 矿化速率越低, 供氮能力越弱; 而 B<sub>C</sub> / B<sub>N</sub> 较低, 表明 B<sub>N</sub> 是植物有效氮的重要储备库和源<sup>[15]</sup>。

Marumoto<sup>[22]</sup>发现, 风干或烘干处理土壤释放的氮素中来源于死亡微生物体的氮分别占矿化氮量的 59% ~ 77%, 平均 66%; Sakamoto等<sup>[25]</sup>分别采用氯仿薰蒸及不同温度处理土壤的方法研究土壤氮素的释放情况, 结果表明, 50 e 和 100 e 下处理土样 24 h 矿化氮量与薰蒸处理后的矿化氮量相同, 认为风干释放的氮素来自 B<sub>N</sub> 的矿化作用。Myrold<sup>[23]</sup>认为, 淹水培养期间矿化出的氮素与 B<sub>N</sub> 或测定 B<sub>N</sub> 时的氮增量 (F<sub>N</sub>) 之间有密切的线性关系; Adams等<sup>[11]</sup>认为矿化出的氮素实际上等于氮增量 (F<sub>N</sub>)。Holms等<sup>[9]</sup>发现, 氮的净矿化呈明显的季节变化, B<sub>N</sub> 则相对稳定, 二者间无任何相关, 认为氮素的有效性不取决于 B<sub>N</sub> 的变化, 而取决于 B<sub>N</sub> 的转化率。Ayanaba等<sup>[3]</sup>发现, B<sub>N</sub> 与短期好气培养法测定的矿化势之间没有相关性, 但与长期通气培养法测定的 N<sub>0</sub> 密切相关。本研究发现, N<sub>0</sub> 与 TN、OC 显著正相关, 表明 N<sub>0</sub> 与 TN、OC 均可作为表征土壤肥力状况指标, 尤其是作为土壤供氮能力的潜在指标。B<sub>C</sub>、B<sub>N</sub> 与 N<sub>0</sub> 亦高度

相关,说明  $B_N$  也可作为表征土壤肥力的指标,但该指标更易随土壤水热状况及耕作制度的变化而变化。 $B_C/OC$  与  $N_0$  呈显著正相关,说明  $B_C/OC$  在一定程度上也可反映土壤肥力水平。

本研究中,氮素矿化速率常数 ( $k$ ) 变化范围较小,在  $0.1008 \sim 0.1051 \text{ w}^{-1}$  之间,平均  $(0.1034 \pm 0.01007) \text{ w}^{-1}$ , 低于 Stanford 等<sup>[29]</sup> 提出的  $0.1054 \text{ w}^{-1}$ , 亦低于白志坚等<sup>[4]</sup> 提出的黄土高原土壤  $k$  值。这可能与黄土高原土壤开垦早、有机质矿化相对较难以及研究条件不同等有关。

在本研究中采用激光法测定土壤颗粒组成,与目前常用的吸管法和比重计法相比,前者根据光的 Fraunhofer 衍射和 Mie 散射理论测定,后者则均以 Stokes 定律为基础测定。基于测定方法原理不同,两者测定结果绝对值之间存在一定的差异,但在反映土壤颗粒分布特征时具有一致性<sup>[21]</sup>。本研究以  $0.101 \text{ mm}$  为界限,将不同粒级土壤颗粒分为  $< 0.101 \text{ mm}$  的物理性粘粒和  $> 0.101 \text{ mm}$  的物理性砂粒。其中,粒径  $> 0.101 \text{ mm}$  颗粒的吸水性、保肥性、粘结性、粘着性和可塑性较差;而粒径  $< 0.101 \text{ mm}$  颗粒的吸水性、保肥性、粘结性、粘着性和可塑性等均相对较强,但通气性、透水性相对较弱,因此,以  $0.101 \text{ mm}$  为界线确定不同大小土壤颗粒具有明确的物理意义。研究结果表明,  $< 0.101 \text{ mm}$  的物理性粘粒与  $B_C$ 、 $B_N$ 、 $TN$ 、 $OC$ 、 $N_0$  均呈显著或极显著的正相关。这一部分土壤颗粒细、表面积大,易与有机质形成复合体。 $> 0.101 \text{ mm}$  的物理性砂粒与各指标均呈显著和极显著的负相关,可能与该类颗粒连接的土壤有机碳、氮矿化较快有关。物理性粘粒与砂粒比值 ( $< 0.101 \text{ mm} / > 0.101 \text{ mm}$ ) 与各指标均呈显著或极显著正相关,与大粒级颗粒 ( $> 0.101 \text{ mm}$ ) 相比,进一步说明小粒级颗粒 ( $< 0.101 \text{ mm}$ ) 对土壤有机质的吸附和保持能力更强。这一方面与小粒级颗粒中有机质含量较高有关,另一方面与小粒级颗粒和有机质复合形成更加稳定的有机无机复合体有关。有研究表明,粗质土  $B_C$  占  $OC$  的比例较细质土低,但粗质土中的  $C/N$  转化较快<sup>[34]</sup>,这与本研究土壤微生物量碳与各土样物理性粘粒 ( $< 0.101 \text{ mm}$ ) 及物理性粘粒和砂粒比值呈正相关性,与物理性砂粒 ( $> 0.101 \text{ mm}$ ) 呈负相关性的结论相一致。

## 5 结 论

1) 土壤  $B_C$  与  $TN$ 、 $OC$  之间呈极显著正相关,相关系数分别为  $0.1846$  和  $0.1683$  ( $P < 0.101$ ), 土壤  $B_N$

与  $TN$ 、 $OC$  之间也呈极显著正相关,相关系数分别为  $0.1661$  和  $0.1519$  ( $P < 0.101$ ), 表明  $B_C$ 、 $B_N$  与土壤肥力关系密切,可作为评价土壤质量的生物学指标。土壤微生物量碳氮比 ( $B_C/B_N$ ) 在  $0.18 \sim 8.16$  之间,较土壤有机碳与全氮比值 ( $5.121 \sim 11.189$ ) 低,说明  $B_N$  是植物有效氮的重要储备库和源。

2)  $B_C$ 、 $B_N$  与土壤氮素矿化势 ( $N_0$ ) 高度相关,相关系数分别为  $0.1741$  和  $0.1665$  ( $P < 0.101$ ), 表明  $B_N$  是表征土壤供氮能力的另一指标。

3) 土壤物理性粘粒 ( $< 0.101 \text{ mm}$ ) 与  $B_C$ 、 $B_N$ 、 $TN$ 、 $OC$ 、 $N_0$  呈显著或极显著正相关,物理性砂粒 ( $> 0.101 \text{ mm}$ ) 与各指标呈显著或极显著负相关,物理性粘粒和砂粒比值与各指标呈显著或极显著正相关。

## 参考文献

- [1] Adams MA, Attewill IM. 1986. Nutrient cycling and n<sub>2</sub> nitrogen mineralization in eucalypt forests of southeastern Australia. *Indices of nitrogen mineralization Plant and Soil*, 92: 341-363
- [2] Anderson F, Domsch KH. 1989. Ratio of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 21: 471-479
- [3] Ayanaba A, Tuckwell SB, Jenkinson DS. 1976. The effects of cleaning and cropping on organic reserves and biomass of tropical forest soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 8: 519-525
- [4] Bai ZJ (白志坚), Zhao GS (赵更生). 1981. Soil nitrogen mineralization potential in Shaanxi Province. *Chinese Journal of Soil Science (土壤通报)*, 12(4): 26-29 (in Chinese)
- [5] Brookes PC, Landmann A, Pruden G, et al. 1985. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: A rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 17: 837-842
- [6] Clark FE. 1977. Internal cycling of <sup>15</sup>N in shortgrass prairie. *Ecology*, 58: 1322-1333
- [7] Collins HP, Rasmussen PE, Douglas CL Jr. 1992. Crop rotation and residue management effects on soil carbon and microbial dynamics. *Soil Science Society of America Journal*, 56: 783-788
- [8] Cooperative Research Group of Chinese Soil Taxonomy, Research Group of Soil Taxonomy, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences (中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组, 中国土壤系统分类课题研究协作组). 1995. *Index on Chinese Soil Taxonomy*. 2nd Ed. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press (in Chinese)
- [9] Holms WE, Zak DR. 1994. Soil microbial biomass dynamics and net nitrogen mineralization in northern hardwood ecosystem. *Soil Science Society of America Journal*, 58: 238-243
- [10] Hu C (胡诚), Cao ZP (曹志平), Ye ZN (叶钟

- 年), et al 2006 Impact of soil fertility maintaining practice on soil microbial biomass carbon in low production agroecosystem in northern China Acta Ecologica Sinica (生态学报), 26(3): 808-814 (in Chinese)
- [11] Jenkinson DS, Brookes PC, Powlson DS 2004 Measuring soil microbial biomass Soil Biology and Biochemistry, 36: 5-7
- [12] Jenkinson DS, Ladd M 1981 Microbial biomass in soil Measurement and turnover// Paul EA, Ladd M, eds Soil Biochemistry New York Marcel Dekker 415-471
- [13] Jordan D, Krøner R J, Bergfeld WA, et al 1995 Evaluation of microbial methods as potential indicators of soil quality in historical agricultural fields Biology and Fertility of Soils 19: 297-302
- [14] Ju X T (巨晓棠), Bian X J (边秀举), Liu X J (刘学军), et al 2000 Relationship between soil nitrogen mineralization parameter with several nitrogen forms Plant Nutrition and Fertilizer Science (植物营养与肥料学报), 6(3): 251-259 (in Chinese)
- [15] Li D P (李东坡), Chen L J (陈利军), Wu Z J (武志杰), et al 2004 Dynamics of microbial biomass N in different fertilized black soil and its related factors Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报), 15(10): 1891-1896 (in Chinese)
- [16] Li N (黎宁), Li H X (李华兴), Zhu F J (朱凤娇), et al 2006 Relationships between soil microbial ecological characteristics and physicochemical properties of vegetable garden soil Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报), 17(2): 285-290 (in Chinese)
- [17] Li S Q (李世清), Li S X (李生秀), Shao M A (邵明安), et al 2004 Effects of long-term application of fertilizers on soil organic nitrogen components and microbial biomass nitrogen in semiarid farmland ecological system. Scientia Agricultura Sinica (中国农业科学), 37(6): 859-864 (in Chinese)
- [18] Li S Q (李世清), Li S X (李生秀), Zhang X C (张兴昌). 1999 Difference of soil microbial biomass nitrogen under different ecological systems Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation (土壤侵蚀与水土保持学报), 5(1): 69-73 (in Chinese)
- [19] Li S Q (李世清), Ling L (凌莉), Li S X (李生秀). 2000 Review on the factors affecting soil microbial biomass nitrogen Soil and Environmental Sciences (土壤与环境), 9(2): 158-162 (in Chinese)
- [20] Lin Q M (林启美), Wu Y G (吴玉光), Liu H L (刘焕龙). 1999 Modification of fumigation extraction method for measuring soil microbial biomass carbon Chinese Journal of Ecology (生态学杂志), 18(2): 63-66 (in Chinese)
- [21] Liu X M (刘雪梅), Huang Y F (黄元仿). 2005 An experiment study on employing laser grain size analyzer to analyze soil mechanical composition Chinese Journal of Soil Science (土壤通报), 36(4): 579-582 (in Chinese)
- [22] Maamoto T. 1984 Mineralization of C and N from microbial biomass Plant and Soil 76: 165-173
- [23] Myrold DD. 1987 Relationship between microbial biomass nitrogen and nitrogen availability index Soil Science Society of America Journal 51: 1047-1049
- [24] Paul EA, Juma NG. 1981 Mineralization and immobilization of soil N nitrogen by microorganisms// Clark FE, Rosswall T, eds Terrestrial Nitrogen Cycles Stockholm: Ecological Bulletins 33: 179-195
- [25] Sakamoto K, Yoshida T, Satoh M. 1992 Comparison of carbon and nitrogen mineralization between fumigation and heating treatments Soil Science and Plant Nutrition, 38: 133-140
- [26] Singh JS, Raghubanshi AS, Singh RS, et al 1989 Microbial biomass acts as a source of plant nutrients in dry tropical forest and savanna Nature 338: 499-500
- [27] Smith JL, Paul EA. 1990 The significance of soil microbial biomass// Bolag M, Stotzky G, eds Soil Biochemistry New York Marcel Dekker 357-396
- [28] Song Q H (宋秋华), Li F M (李凤民), Liu H S (刘洪升), et al 2003 Effect of plastic film mulching on soil microbial biomass in spring wheat field in semiarid loess area Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报), 14(9): 1512-1516 (in Chinese)
- [29] Stanford G, Smith SJ 1972 Nitrogen mineralization potential of soil Soil Science Society of America Proceedings 36: 465-472
- [30] Vance ED, Brookes PC, Jenkinson DC 1987 An extraction method for measuring soil microbial biomass C Soil Biology and Biochemistry, 19: 703-707
- [31] Witter E, Mortensson AM, Garcia FV. 1993 Size of the soil microbial biomass in a long-term field experiment as affected by different N<sub>2</sub> fertilizers and organic manures Soil Biology and Biochemistry, 25: 659-669
- [32] Zhang H Y (张海燕), Xiao Y H (肖延华), Zhang X D (张旭东), et al 2006 Microbial biomass as an indicator for evaluation of soil fertility properties Chinese Journal of Soil Science (土壤通报), 37(3): 422-425 (in Chinese)
- [33] Zhang Y L (张亚丽), Zhang J (张娟), Shen Q R (沈其荣), et al 2002 Effect of combined application of bioorganic manure and inorganic nitrogen fertilizer on soil nitrogen supplying characteristics Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报), 13(12): 1575-1578 (in Chinese)
- [34] Zhao X L (赵先丽), Cheng H T (程海涛), Li G H (吕国红), et al 2006 Advances in soil microbial biomass Journal of Meteorology and Environment (气象与环境学报), 22(4): 68-72 (in Chinese)

作者简介 金发会,女,1975年生,硕士研究生。主要从事土壤植物氮素营养方面的研究。E-mail jinzil9751009@sohu.com

责任编辑 张凤丽