

川西平原土壤微生物生物量碳氮磷含量特征及其影响因素分析

吴晓玲, 张世熔, 蒲玉琳, 徐小逊, 李云

引用本文:

吴晓玲, 张世熔, 蒲玉琳, 等. 川西平原土壤微生物生物量碳氮磷含量特征及其影响因素分析[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2019, 27(10): 1607–1616.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190328>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

甘肃中部沿黄灌区马铃薯连作对土壤化学和生物学性质的影响

Effect of continuous potato monoculture on soil chemical and biological properties in Yellow River Irrigation Area in central Gansu Province

中国生态农业学报. 2017, 25(4): 581–593 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160848>

潮土农田微生物研究进展*

Research progresses of farmland microorganisms in fluvo-aquic soil of China

中国生态农业学报. 2016, 24(4): 416–434 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.151347>

PLFA方法研究连作对加工番茄根际土壤微生物群落结构的影响

Microbial community structure in rhizosphere soils of long-term continuously cropped processing tomato based on PLFA method

中国生态农业学报. 2017, 25(4): 594–604 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160844>

冬小麦免耕覆盖与有机栽培对土壤微生物群落组成的影响

Effects of no-tillage, mulching and organic fertilization on soil microbial composition in winter wheat field

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(2): 267–276 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180583>

生物质改良剂对川西北地区高寒草地沙化土壤有机碳特征的影响

Effects of different biomass amendments on soil organic carbon characteristics in alpine desertification grassland of Northwest Sichuan

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(11): 1732–1743 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190248>

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190328

吴晓玲, 张世熔, 蒲玉琳, 徐小逊, 李云. 川西平原土壤微生物生物量碳氮磷含量特征及其影响因素分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(10): 1607-1616

WU X L, ZHANG S R, PU Y L, XU X X, LI Y. Distribution characteristics and impact factors of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in western Sichuan plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(10): 1607-1616

川西平原土壤微生物生物量碳氮磷含量 特征及其影响因素分析*

吴晓玲^{1,2}, 张世熔^{1,2**}, 蒲玉琳³, 徐小逊^{1,2}, 李云³

(1. 四川农业大学环境学院 成都 611130; 2. 四川省土壤环境保护重点实验室 成都 611130; 3. 四川农业大学资源学院 成都 611130)

摘要: 本文通过区域调查采样和统计分析, 探讨了川西平原土壤微生物生物量碳(MBC)、土壤微生物生物量氮(MBN)和土壤微生物生物量磷(MBP)含量特征及其对气候、海拔、母质和土地利用等因素的响应, 揭示了其关键影响因素, 以为川西平原地区土壤质量管理提供参考。结果表明, 不同土壤类型的 MBC、MBN 和 MBP 含量表现为冲积土显著高于水稻土、潮土和黄壤($P<0.05$), 潮土 MBC/MBN 显著高于水稻土。气候和海拔的影响为: MBC、MBN 和 MBP 含量随着 ≥ 0 积温、 ≥ 10 积温、年均温和年均降水量的增加呈指数减少, 而随干燥度和海拔增加呈线性增加。不同成土母质中, MBC、MBN 和 MBP 含量均为灰色冲积物显著高于老冲积物。不同土地利用方式下, 三者含量为草地显著高于水田和旱地, 水田、旱地和林地差异不显著。皮尔森相关分析和冗余分析表明, MBC 和 MBN 均与 ≥ 0 积温、年均温呈极显著负相关($P<0.01$), 与海拔呈极显著正相关关系, MBP 与母质呈现极显著负相关关系。逐步回归分析表明, MBC 主要受年均温、干燥度、年均降水量和母质的影响; MBN 主要受海拔、干燥度和年均降水量的综合影响; MBP 主要受母质、年均温、 ≥ 10 积温和年均降水量的调控。因此, 川西平原土壤 MBC、MBN、MBP 能灵敏地反映不同采样点气候的变化, 可为该区气候变化下土壤碳、氮、磷的响应预测提供参考。

关键词: 土壤微生物生物量碳; 土壤微生物生物量氮; 土壤微生物生物量磷; 气候; 海拔; 母质; 土地利用

中图分类号: S154.1

文章编号: 2096-6237(2019)10-1607-10

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



Distribution characteristics and impact factors of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in western Sichuan plain*

WU Xiaoling^{1,2}, ZHANG Shirong^{1,2**}, PU Yulin³, XU Xiaoxun^{1,2}, LI Yun³

(1. College of Environmental Sciences, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2. Sichuan Provincial Key Laboratory of Soil Environmental Protection, Chengdu 611130, China; 3. College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

* 四川省重点研发项目(19ZDYF2427)和四川省环境保护科技项目计划(2018HB30)资助

** 通信作者: 张世熔, 主要从事土壤生态与修复方面的研究。E-mail: Srzhang01@aliyun.com

吴晓玲, 主要从事土壤生态方面的研究。E-mail: wuxiaoling1222@163.com

收稿日期: 2019-04-29 接受日期: 2019-07-22

* The study was supported by the Key Research and Development Program of Sichuan Province (19ZDYF2427) and the Science and Technology Project for Sichuan Environmental Protection (2018HB30).

** Corresponding author, E-mail: Srzhang01@aliyun.com

Received Apr. 29, 2019; accepted Jul. 22, 2019

Abstract: The characteristics of soil microbial biomass carbon (MBC), soil microbial biomass nitrogen (MBN), and soil microbial biomass phosphorus (MBP) contents, and their responses to climate, altitude, parent material and land use in the western Sichuan plain were investigated by regional survey and statistical analysis. The key influencing factors were subsequently revealed, which provided theoretical guidance for soil quality management in western Sichuan plain. Results showed that MBC, MBN and MBP were significantly higher in alluvial soil than in paddy soil, fluvo-aquic soil, and yellow earth ($P < 0.05$); moreover, MBC/MBN of fluvo-aquic soil was significantly higher than that of paddy soil. With respect to the influence of climate and elevation, MBC, MBN, and MBP exponentially declined with increasing accumulated temperature above 0 °C, accumulated temperature above 10 °C, mean annual temperature (MAT) and mean annual precipitation (MAP). However, they were augmented with increasing aridity and altitude. For different parent soil materials, the soil that developed from gray alluvial soil had higher MBC, MBN and MBP contents than those developed from glacial till. Meanwhile, they were significantly higher in the grassland than in paddy field and dry land. However, there were no significant differences between paddy field, dry land, and forest land. Pearson correlation and redundancy analyses revealed that the MBC and MBN had highly significant negative relationships with accumulated temperature above 0 °C and MAT, while, they had highly significant positive relationships with altitude ($P < 0.01$). In addition, MBP had a highly significant negative relationship with parent material. Furthermore, stepwise regression analysis showed that the main impact factors for MBC were MAT, MAP, and parent material, and aridity; MBN was affected by altitude, aridity, and MAP; MBP was primarily controlled by parent material, accumulated temperature above 10 °C, and MAP. Therefore, soil MBC, MBN and MBP can sensitively reflect the climate change in different sampling points in western Sichuan plain, providing an essential basis for predicting the response of soil carbon, nitrogen, and phosphorus to climatic changes.

Keywords: Soil microbial biomass carbon; Soil microbial biomass nitrogen; Soil microbial biomass phosphorus; Climate; Altitude; Parent material; Land use

土壤微生物生物量不仅是土壤活性养分库评估的重要参数, 而且也是陆地生态系统中对环境变化敏感的指标^[1-2]。其中土壤微生物生物量碳(soil microbial biomass carbon, MBC)、土壤微生物生物量氮(soil microbial biomass nitrogen, MBN)和土壤微生物生物量磷(soil microbial biomass phosphorus, MBP)3个指标在生态系统碳氮磷循环中起着重要作用。关于前二者及其耦合的研究虽有一定报道^[3-4], 但同时关于三者及同步耦合的系统研究却鲜见报道。因此, 开展土壤MBC、MBN和MBP含量评价及其主要影响因素研究, 对于阐释区域土壤有机质及氮磷养分转化过程具有重要意义。

Mukherjee等^[5]在印度莫汉普尔的实验农场研究结果显示, 冲积土MBC含量为493 mg·kg⁻¹; Ju等^[6]研究表明, 河南潮土MBC含量为177 mg·kg⁻¹, 而MBN为28.1 mg·kg⁻¹; 刘定辉等^[7]对成都平原冲积水稻土研究表明, 在小麦(*Triticum aestivum*)收获期MBC和MBN含量分别是229 mg·kg⁻¹和15.2 mg·kg⁻¹; Yan等^[8]对湖南长沙典型黄壤的研究表明, 其MBC和MBN含量分别为76~262 mg·kg⁻¹和15.0~40.0 mg·kg⁻¹。因此, 不同区域环境因素作用下形成的土壤, MBC和MBN含量存在差异。目前, 尽管冲积土、潮土、水稻土和黄壤等单一土壤类型的微生物生物量已有报道, 但系统对比区域内几种土壤类型MBC、MBN和MBP分布特征的研究仍少见报道。

研究表明, 土壤微生物生物量的影响因素除了土壤性质外, 还涉及气候、成土母质、地形以及土地利用方式等。首先, 温度和降水作为两大主要的气候因素, 其对土壤MBC、MBN和MBP的影响已有报道。刘秉儒^[9]对贺兰山区的研究表明, 年均温与MBC和MBN均呈极显著负相关($P < 0.01$), 而年均降水量与MBC和MBN呈极显著正相关($P < 0.01$); Zhang等^[10]对黄土高原西北部的研究表明, 土壤MBC与年均降水量关系并不显著($P > 0.05$); 而Li等^[11]在韩国首尔的试验表明, MBC和MBN随着处理小区内温度或降水的增加而增加, 且温度和降水有一定的交互作用。其次, 海拔作为主要地形因素之一, 现有研究多集中讨论高海拔地区与土壤微生物生物量的关系。例如, 曹瑞等^[12]对川西高山峡谷区不同海拔梯度下土壤MBC和MBN的研究表明, 表层土壤MBC和MBN含量随海拔增加均呈现先增加后减少再增加的趋势。但在低海拔地区, 海拔与土壤微生物生物量碳氮的关系仍有待探讨。第三, 成土母质控制土壤的物理化学组成, 也影响土壤微生物的活性。Deng等^[13]对江西典型亚热带不同母质发育的红壤微生物生物量研究表明, 花岗岩母质发育的红壤显著大于第四纪红色黏壤发育的土壤($P < 0.05$)。但是, 少有其他区域不同母质间微生物生物量的对比研究。第四, 土地利用方式作为土壤微生物生物量为干扰中的关键因素受到大多数学者的关注, 但研

究结果不尽相同。Liu 等^[14]研究表明, 在 0~10 cm 土层, 草地土壤 MBC 含量显著高于果园、农田和弃耕地, 而土壤 MBN 含量表现为果园和农田显著高于草地和弃耕地($P < 0.05$)。周正虎等^[15]在帽儿山地区的研究表明, 土壤 MBC、MBN 和 MBP 含量均呈现林地>草地>农田, 且三者差异显著($P < 0.05$)。综上所述, 关于土壤微生物生物量的影响因素与影响结论仍存在一定的争议, 并且建立土壤 MBC、MBN 和 MBP 与单一环境因素影响关系的模型较多, 而多环境因素综合影响关系的模型还较少, 特别是综合利用冗余分析和逐步回归分析等方法系统探讨环境因素对土壤微生物生物量影响的研究还鲜见报道。

川西平原是我国重要的粮油生产基地。该平原北高南低, 南北长约 200 km。区内温度和降水变化差异大, 属亚热带季风气候区。平原内分布有灰色冲积物、紫色冲积物和老冲积物 3 种成土母质, 形成冲积土、潮土、水稻土和黄壤等土壤类型。此外, 土地利用方式多样, 垦殖率高利用强度大。因此, 该平原是系统研究土壤微生物生物量碳、氮、磷的含量特征及其主要影响因素的理想区域。本文在利用方差分析和回归相关分析研究该区域气候、海拔、成土母质和土地利用方式等单个环境因素对 MBC、MBN 和 MBP 影响基础上, 拟通过冗余分析和逐步回归方法研究它们受这些环境因素综合影响的效应, 以期为该区域土壤质量管理提供参考。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

选取四川盆地西部的川西平原作为研究区域, 其地理位置介于 $103^{\circ}18' \sim 104^{\circ}53'E$, $29^{\circ}37' \sim 31^{\circ}55'N$ 。地势平坦, 自西北向东南微斜, 海拔 749~393 m。属于中亚热带湿润季风气候, 年平均气温为 13.2~17.2, 年平均降水量为 901.7~1 408.7 mm, ≥ 0 积温为 4 815.1~6 260.6, ≥ 10 积温为 3 900.9~5 494.3。成土母质主要为第四系全新统灰色冲积物、紫色冲积物和第四系更新统老冲积物等。根据调查, 该区域土壤类型主要有冲积土、潮土、水稻土和黄壤, 且耕地(水田和旱地)、林地、草地是其 主要土地利用方式。

1.2 土壤样品采集

根据研究区域气候、地形、土壤类型、土地利用方式等信息, 随机设计样点初步位置, 并于 2018 年 9 月采样。样品野外采集时, 在每个地块设置 30 m×30 m 的样方, 样方内采用 5 点取样法将每个子样点去除表面 3 mm 浮土后, 采集表层土(0~20 cm)并混合

均匀, 再用四分法将土样缩减为 1 kg, 得到供试土样; 同时记录每个样点的地理坐标、海拔、成土母质、土壤类型、土地利用方式等信息。每个土样带回室内去除动植物残体、石砾和侵入体后分为两部分, 一部分密封保存于 4 冰箱, 用于测定土壤 MBC、MBN 和 MBP; 另一部分按常规土壤理化性质的测定要求, 自然风干后磨细过筛用于测定土壤有机质、全氮和全磷。

本研究共采取 38 个供试土样, 其中土壤类型间样品数分别为冲积土 5 个、潮土 15 个、水稻土 13 个和黄壤 5 个; 成土母质的样品数分别是灰色冲积物 11 个、紫色冲积物 13 个、老冲积物 14 个; 土地利用方式样品分布为水田 13 个、旱地 12 个、林地 8 个和草地 5 个。

1.3 土壤样品测定

土壤微生物生物量测定前, 将待测土样在 25 100%空气湿度的标准条件下预培养 7 d。其中, 土壤 MBC 测定采用熏蒸提取-容量分析法, MBN 的测定采用熏蒸提取-茚三酮比色法, MBP 测定采用氯仿熏蒸提取-无机磷比色法^[16]。

土壤 pH 测定采用电位法, 土水比 1(m) 5(V), 土壤含水量测定采用烘干法, 土壤有机质测定采用重铬酸钾-外加热容量法, 全氮测定采用半微量凯氏定氮法, 全磷测定采用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法^[17]。所有样品的测定均设置 3 次重复。

1.4 数据处理与分析

本研究的气象数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心网站(<http://www.resdc.cn/>), 在地理信息系统软件 ArcGIS 10.2 平台上提取各样点年均温、 ≥ 0 积温、 ≥ 10 积温、年均降水量、干燥度共 5 个指标。在 SPSS 19.0 软件平台上, 采用单因素方差分析(One-Way ANOVON)检验不同土壤类型、成土母质和土地利用方式之间土壤 MBC、MBN、MBP 含量的差异显著性, 平均数间多重比较采用最小显著差数法(LSD), 显著水平设为 0.05, 极显著水平设为 0.01; 通过回归分析建立土壤 MBC、MBN、MBP 含量与 ≥ 0 积温、 ≥ 10 积温、年均温、年均降水量、干燥度和海拔间的定量关系模型; 采用皮尔森相关分析确定土壤 MBC、MBN、MBP 含量与 ≥ 0 积温、 ≥ 10 积温、年均温、年均降水量、干燥度、海拔、母质和土地利用方式间的相关性; 利用 Canoco 4.5 软件对影响因素进行冗余分析(RDA), 并采用蒙特卡罗检验(Monte Carlo permutation test)排序轴特征值的显著性; 采用逐步回归分析建立多因素下的综合响应模型。采用 Origin Pro 9.1 制图。

2 结果与分析

2.1 土壤微生物生物量碳氮磷的含量特征

研究区域土壤MBC、MBN和MBP含量分别为203.36~817.92 mg·kg⁻¹、15.16~81.70 mg·kg⁻¹和2.27~13.56 mg·kg⁻¹，平均值分别为(516.58±167.32) mg·kg⁻¹、(47.74±15.96) mg·kg⁻¹和(6.27±2.94) mg·kg⁻¹。其中，MBC占土壤有机碳的0.86%~5.86%，MBN占全氮的1.71%~7.55%，MBP占全磷的0.40%~1.98%。三者以冲积土最高，黄壤最低，冲积土MBC、MBN和MBP含量分别达黄壤的1.96倍、2.32倍和2.59倍。方差分析结果表明，冲积土的MBC、MBN和MBP含量显著高于潮土、水稻土和黄壤($P<0.05$)。潮土MBC和MBP

含量显著高于水稻土和黄壤，潮土MBN含量显著高于黄壤($P<0.05$)。

该区域内MBC/MBN、MBC/MBP和MBN/MBP分别为6.67~14.82、45.24~179.90和4.18~14.13，均值分别为11.07±2.25、92.31±36.08和8.43±3.01。由表1可知，水稻土的MBC/MBN显著低于潮土($P<0.05$)。这可能是由于水稻土施肥较多，土壤氮含量高导致土壤MBN含量较高，从而引起MBC/MBN偏低。然而，不同土壤类型间的MBC/MBP和MBN/MBP未达到差异显著性(表1)，可能是由于土壤微生物生物量在环境中还受到温度、降水和其他土壤性质等多种因素的影响。

表 1 不同土壤类型的土壤微生物生物量碳氮磷含量及土壤性质

Table 1 Contents of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus and soil properties of different soil types

测试指标 Variable	土壤类型 Soil type			
	冲积土 Alluvial soil (n=5)	潮土 Fluvo-aquic soil (n=15)	水稻土 Paddy soil (n=13)	黄壤 Yellow earth (n=5)
pH	7.36~7.78	4.59~7.68	4.52~7.89	4.45~5.49
土壤有机碳 Soil organic carbon (g·kg ⁻¹)	22.93±5.56a	19.43±5.90ab	18.53±4.56ab	14.87±5.01b
全氮 Total nitrogen (g·kg ⁻¹)	1.31±0.22a	1.06±0.24b	0.87±0.17c	0.94±0.19bc
全磷 Total phosphorus (g·kg ⁻¹)	0.89±0.25a	0.75±0.23a	0.80±0.27a	0.77±0.21a
MBC (mg·kg ⁻¹)	702.88±73.70a	536.49±90.59b	482.77±182.72bc	358.42±211.64c
MBN (mg·kg ⁻¹)	66.24±14.52a	46.73±11.06b	47.28±14.45b	28.55±11.05c
MBP (mg·kg ⁻¹)	9.88±3.30a	6.72±2.76b	5.41±2.09bc	3.81±1.33c
MBC/MBN	11.00±2.43ab	11.89±2.52a	10.23±1.63b	11.36±2.11ab
MBC/MBP	80.67±36.15a	94.30±45.07a	94.84±29.83a	91.36±24.41a
MBN/MBP	7.58±3.63a	7.75±2.75a	9.70±3.30a	8.04±1.93a

MBC: 土壤微生物生物量碳; MBN: 土壤微生物生物量氮; MBP: 土壤微生物生物量磷; n: 样品个数。同行不同小写字母表示土壤类型间差异显著($P<0.05$)。MBC: soil microbial biomass C; MBN: soil microbial biomass N; MBP: soil microbial biomass P; n: samples number. Different lowercase letters in the same line mean significant differences at 0.05 level among different soil types.

2.2 影响土壤微生物生物量碳氮磷的单因素分析

2.2.1 温度和降水

温度能通过影响土壤微生物的生存微环境，从而导致土壤微生物生物量的改变^[18]。年均温和积温作为主要的热量指标，对土壤MBC、MBN和MBP含量的影响方式也较为相似。在本研究中，土壤MBC、MBN和MBP均随年均温增加而呈指数减少(图1, $P<0.01$)。这可能是由于温度的增加，土壤有机质易分解而累积量相对较少，导致微生物活动水平相对较低。随着 ≥ 0 积温和 ≥ 10 积温增加，MBC、MBN和MBP均呈指数降低趋势，且均达极显著水平。类似地，在该平原区， ≥ 0 积温和 ≥ 10 积温增加，土壤温度长年处于较高水平，也有利于土壤有机物的分解，导致MBC、MBN和MBP随二者呈指数减少($P<0.01$)。

降水影响土壤水分含量和透水通气状况，调控着生物群落的结构和功能^[19]，进而影响土壤MBC、

MBN和MBP的含量。本研究土壤MBC含量随年均降水量增加而呈指数减少(图2, $P<0.01$)，土壤MBN、MBP含量也随之呈显著指数减少($P<0.05$)。土壤MBC与干燥度呈极显著线性正相关，MBN、MBP含量与干燥度呈显著线性正相关。

2.2.2 海拔

海拔作为重要的地形因素，其高度变化会引起多种环境因素如温度、光照、水分等的变化^[20-21]，从而影响土壤微生物群落及其数量。在本研究中，随着海拔的增加，土壤MBC、MBN和MBP含量呈极显著线性增长($P<0.01$)。这与曹瑞等^[12]报道的川西高山峡谷区不同海拔土壤MBC和MBN含量随海拔增加呈现先增加后减少再增加的变化趋势不同。这可能是由于川西平原面积较大，海拔变化及其导致的温度、土壤水分和土壤有机质的变化与前者的变化规律不一致。

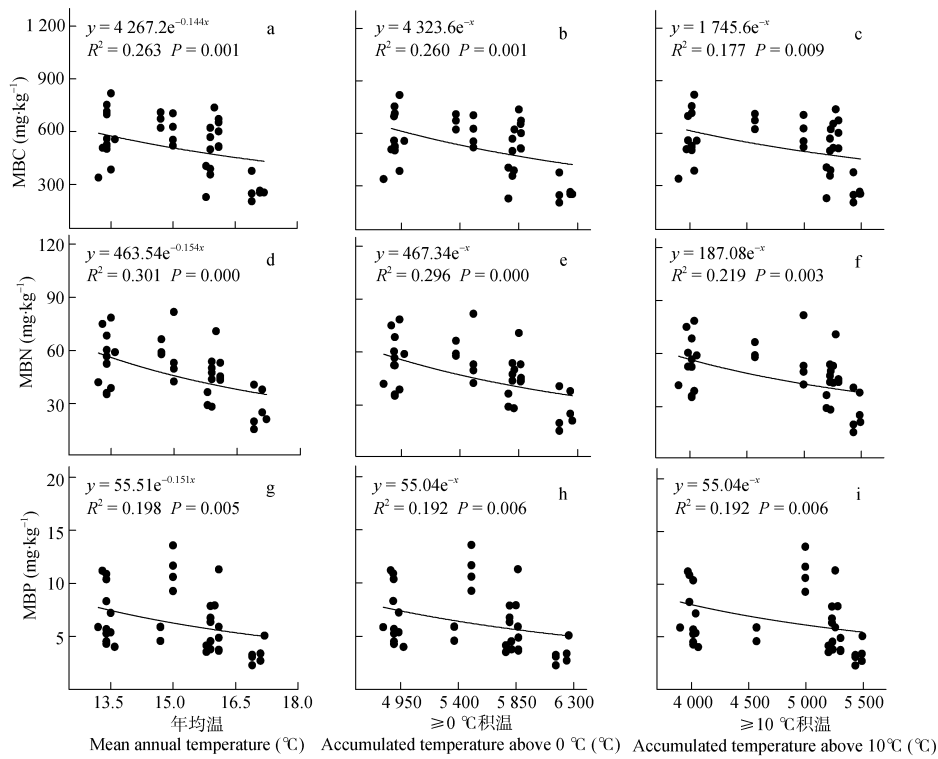


图 1 川西平原土壤微生物生物量碳氮磷含量与年均温、 ≥ 0 积温和 ≥ 10 积温的关系

Fig. 1 Relationship between soil microbial biomass C, N and P contents and mean annual temperature, accumulated temperature above 0 , accumulated temperature above 10

MBC: 土壤微生物生物量碳; MBN: 土壤微生物生物量氮; MBP: 土壤微生物生物量磷。MBC: soil microbial biomass C; MBN: soil microbial biomass N; MBP: soil microbial biomass P.

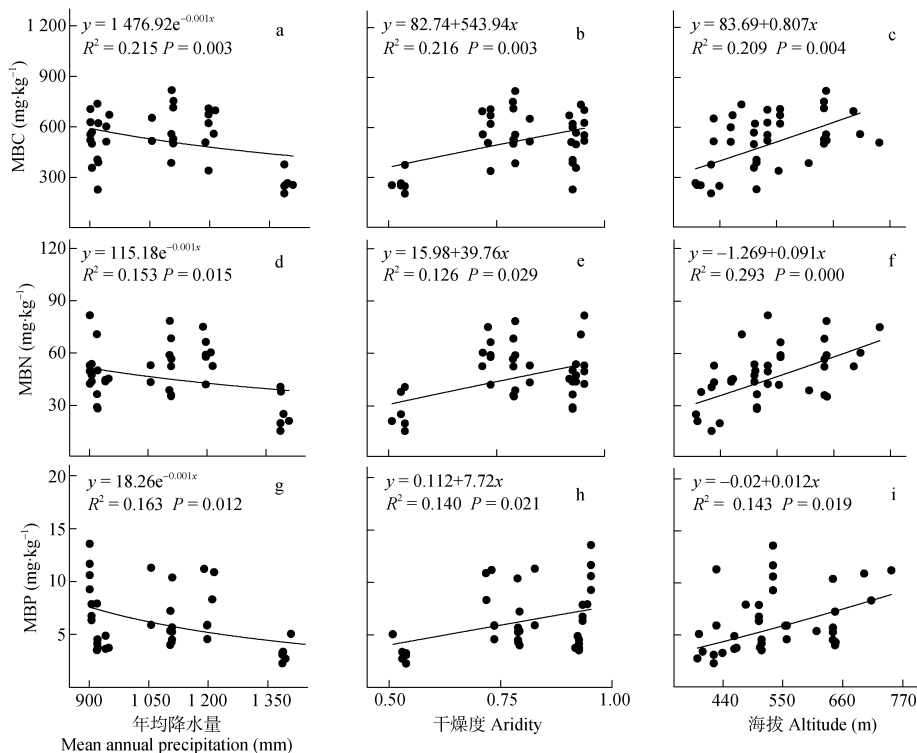


图 2 川西平原土壤微生物生物量碳氮磷含量与年均降水量、干燥度和海拔的关系

Fig. 2 Relationship between soil microbial biomass C, N and P contents and mean annual precipitation, aridity, altitude

MBC: 土壤微生物生物量碳; MBN: 土壤微生物生物量氮; MBP: 土壤微生物生物量磷。MBC: soil microbial biomass C; MBN: soil microbial biomass N; MBP: soil microbial biomass P.

2.2.3 成土母质

成土母质为土壤生物生长提供了必要的大量营养物质,影响着土壤微生物结构和群落,因而也影响着土壤微生物生物量^[22-23]。在本研究区域内,灰色冲积物MBC含量比老冲积物MBC含量高29.40%($P < 0.05$,表2),但紫色冲积物与二者差异并不显著($P > 0.05$)。灰色冲积物中MBN和MBP含量均显著高于紫色冲积物和老冲积物中MBN和MBP含量($P < 0.05$),且分别比后两者高36.75%、27.15%和

117.75%、83.87%。然而,老冲积物和紫色冲积物中MBN和MBP含量差异并不显著($P > 0.05$)。可能是由于本研究中灰色冲积物发育的土壤多为水田和河床旁草地,其中作物秸秆还田或植物凋落物返回土壤较多,水分条件较好,导致有机物易于积累,因此土壤微生物生物量较高;而老冲积物发育形成的土壤获得的秸秆或有机凋落物较少,且由于其分布的高阶地水土流失较强,土壤有机质分解相对较快,因此,土壤MBC、MBN和MBP含量较低。

表 2 不同成土母质和土地利用方式下土壤微生物生物量碳氮磷含量特征
Table 2 Contents of soil microbial biomass C, N and P under different soil parent materials and land use

		MBC (mg·kg ⁻¹)	MBN (mg·kg ⁻¹)	MBP (mg·kg ⁻¹)
母质 Parent material	灰色冲积物 Gray alluvium (n=11)	604.65±103.56a	57.56±14.43a	9.69±2.39a
	紫色冲积物 Purple alluvium (n=13)	495.15±173.79ab	42.09±14.79b	4.45±1.37b
	老冲积物 Glacial till (n=14)	467.27±184.14b	45.27±15.59b	5.27±2.06b
土地利用方式 Land use type	水田 Paddy field (n=13)	482.77±182.72b	47.93±15.14b	5.31±2.09b
	旱地 Dry land (n=12)	467.85±137.32b	42.13±16.85b	6.73±3.23b
	林地 Forest land (n=8)	528.15±163.92ab	44.27±8.69b	4.89±1.45b
	草地 Grassland (n=5)	702.88±73.70a	66.24±14.52a	9.88±3.30a

MBC: 土壤微生物生物量碳; MBN: 土壤微生物生物量氮; MBP: 土壤微生物生物量磷; n: 样品个数。同列不同小写字母表示不同母质/土地利用方式间差异显著($P < 0.05$)。MBC: soil microbial biomass C; MBN: soil microbial biomass N; MBP: soil microbial biomass P. n: samples number. Different lowercase letters in the same column mean significant differences at 0.05 level among parent materials or land use types.

2.2.4 土地利用方式

不同土地利用方式影响植物群落组成和结构以及植物-土壤的相互作用过程^[14],从而改变土壤微生物生物量。由表2可知,MBC、MBN和MBP均为草地含量最高,草地MBC含量显著高于水田和旱地(表2),且草地MBN和MBP含量显著高于其他3种土地利用方式,而林地、水田和旱地中的MBC、MBN和MBP含量差异均不显著。在本研究区,草地表层土壤可能因根系分布密集,其分泌物促进了微生物的活动,导致了MBC、MBN和MBP较高^[24]。

2.3 影响土壤微生物生物量碳氮磷的多因素综合分析

2.3.1 皮尔森相关分析和冗余分析

为探究川西平原土壤MBC、MBN和MBP含量的影响因素,本研究首先采用了皮尔森相关性分析。结果表明,MBC和MBN均与 ≥ 0 积温、年均温和海拔达到极显著相关(表3),MBP与母质呈现极显著相关。此外,MBC与 ≥ 10 积温、年均降水量、成土母质和土地利用方式呈显著相关;MBN与干燥度呈显著相关($P < 0.05$),而与年均降水量、成土母质和土地利用方式关系不显著($P > 0.05$);MBP与 ≥ 0 积温、年均温、干燥度、年均降水量、海拔和土地利用关系显著。

表 3 环境因素与土壤微生物生物量碳氮磷及其冗余分析排序轴的相关性

Table 3 Correlation between environmental factors and soil microbial biomass C, N and P contents and their RDA sequencing axis from redundancy analysis

分析方法 Analysis method	指标 Variable	AT0	AT10	MAT	AD	MAP	ELE	PM	LU
皮尔森相关分析 Pearson correlation analysis	MBC (mg·kg ⁻¹)	-0.480**	-0.402*	-0.483**	0.465**	-0.405*	0.459**	-0.328*	0.371*
	MBN (mg·kg ⁻¹)	-0.522**	-0.459**	-0.527**	0.358*	NS	0.540**	NS	NS
	MBP (mg·kg ⁻¹)	-0.362*	NS	-0.370*	0.372*	-0.349*	0.377*	-0.579**	0.331*
冗余分析 Redundancy analysis	第 1 轴 1 st axis	0.525**	0.432**	0.531**	-0.460**	0.406**	-0.528**	0.456**	-0.366*
	第 2 轴 2 nd axis	NS	NS	NS	NS	NS	NS	-0.329*	NS

AT0: ≥ 0 积温; AT10: ≥ 10 积温; MAT: 年均温; AD: 干燥度; MAP: 年均降水量; ELE: 海拔; PM: 母质; LU: 土地利用方式; MBC: 土壤微生物生物量碳; MBN: 土壤微生物生物量氮; MBP: 土壤微生物生物量磷; NS: 相关性不显著; *: $P < 0.05$ 水平显著相关; **: $P < 0.01$ 水平显著相关, $n=38$. AT0: accumulated temperature above 0 ; AT10: accumulated temperature above 10 ; MAT: mean annual temperature; AD: aridity; MAP: mean annual precipitation; ELE: altitude; PM: parent material; LU: land use; MBC: soil microbial biomass C; MBN: soil microbial biomass N; MBP: soil microbial biomass P. NS: no significant correlation; *: significant correlation at $P < 0.05$; **: significant correlation at $P < 0.01$; $n = 38$.

为进一步验证和解释环境因素与土壤MBC、MBN和MBP之间的相互作用关系,将研究区38个样点的MBC、MBN与MBP含量作为物种指标(species),并选取 ≥ 0 积温、 ≥ 10 积温、年均温、年均降水量、干燥度、海拔、成土母质和土地利用方式共8个指标作为环境因素(environments)进行冗余分析。结果表明, ≥ 0 积温、 ≥ 10 积温、年均温、年均降水量、干燥度、海拔和成土母质均与第1轴达极显著水平(表3, $P < 0.01$),土地利用方式与第1轴达显著水平($P < 0.05$);而第2轴仅与成土母质达显著水平(表3, $P < 0.05$)。因此,第1轴能较好地解释这些影响因素对川西平原土壤MBC、MBN和MBP含量分布问题,且第1轴和第2轴累积解释量为58.4%。同时Monte Carlo置换检验的结果表明,所有排序轴进行检验均达极显著相关($P = 0.001$),表明排序轴与影响因素之间的线性拟合程度能较好地反映其与MBC、MBN和MBP的关系。由冗余分析的二维排序图(图3)可知,MBC、MBN和MBP与干燥度、海拔和土地利用方式呈正相关,而与其他5个环境因素呈负相关,这与皮尔森相关分析和单因素分析结果相同。

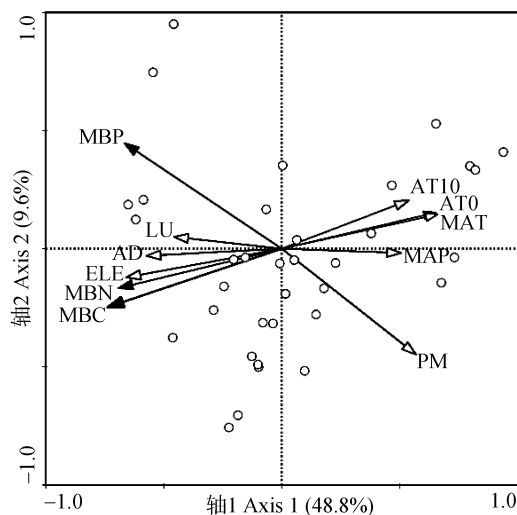


图3 环境因素与土壤微生物生物量碳氮磷含量的冗余分析二维排序图

Fig. 3 Two-dimensional sequence diagram of redundancy analysis between environmental factors and soil microbial biomass C, N and P contents

MAT: 年均温; AT0: ≥ 0 积温; AT10: ≥ 10 积温; MAP: 年均降水量; AD: 干燥度; PM: 母质; ELE: 海拔; LU: 土地利用方式; MBC: 土壤微生物生物量碳; MBN: 土壤微生物生物量氮; MBP: 土壤微生物生物量磷。MAT: mean annual temperature; AT0: accumulated temperature above 0 ; AT10: accumulated temperature above 10 ; MAP: mean annual precipitation; AD: aridity; PM: parent material; ELE: altitude; LU: land use; MBC: soil microbial biomass C; MBN: soil microbial biomass N; MBP: soil microbial biomass P.

2.3.2 逐步回归分析

为进一步定量观察在多环境因素综合影响下的土壤MBC、MBN和MBP的变化趋势,本研究选择年均温(MAT)、 ≥ 0 积温(AT0)、 ≥ 10 积温(AT10)、年均降水量(MAP)、干燥度(AD)、海拔(ELE)、成土母质(PM)和土地利用方式(LU)共8个指标进行逐步回归分析。结果表明,土壤MBC可以分别由两个模型表达(表4),综合这两个模型的分析结果,年均温、干燥度和年均降水量和母质是土壤MBC的主要影响因素。其中,土壤MBC与干燥度和年均降水量呈正相关($P < 0.05$),而与年均温和母质呈负相关($P < 0.05$)。土壤MBN的主要影响因素是海拔、干燥度和年均降水量,MBN分别与三者呈显著正相关($P < 0.05$)。土壤MBP则分别与母质和年均温呈显著负相关($P < 0.05$),而与 ≥ 10 积温和年均降水量分别呈显著正相关($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 不同土壤类型下土壤微生物生物量碳氮磷含量变化

不同类型土壤因物理化学及生物学性质的差异,导致土壤微生物生物量存在差异。在本研究中,川西平原冲积土、潮土、水稻土、黄壤4种土壤类型的MBC、MBN和MBP存在显著差异(表1, $P < 0.05$)。三者含量以冲积土最高,黄壤最低。这可能是由于本研究区冲积土多为草地土壤,土壤的有机碳、全氮、全磷含量相对较高,从而导致微生物生物量亦高。同时,该结果也高于Mukherjee等^[5]研究中冲积土的MBC含量($493 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。黄壤因获得秸秆或有机凋落物较少,且水土流失较强,土壤有机质和全氮相对较低,所以其MBC、MBN和MBP也低,并与其他区域黄壤的MBC、MBN和MBP含量水平接近^[8,25]。

土壤MBC/MBN可以反映土壤微生物群落结构信息,有研究表明,MBC/MBN在细菌中大约为5:1,放线菌中为6:1左右,而真菌中约为10:1^[26-27]。在本研究中,不同土壤类型MBC/MBN介于10.23~11.89,表明该区域真菌可能在微生物生物量碳氮循环中占主导地位。潮土MBC/MBN显著高于水稻土,可能是因为种植作物不同所致。川西平原农田有机物来源以秸秆还田为主,其潮土中旱地多以玉米(*Zea mays*)-小麦/油菜(*Brassica napus*)秸秆为主,而水稻土多以水稻(*Oryza sativa*)-蔬菜/油菜秸秆为主。因此,潮土的C:N比水稻土略高($P < 0.05$)。Xu等^[28]对全球陆地生态系统进行了分析,指出土壤MBC/MBN、MBC/MBP和MBN/MBP均值分别为7.6、

表 4 土壤微生物生物量碳氮磷多环境因素综合影响的逐步回归分析模型

Table 4 Stepwise regression analysis models of environment factors and soil microbial biomass C, N and P contents

指标 Variable	模型 Model	R^2	P
MBC ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	$\text{MBC}=-10\ 636.1-0.73\text{MAT}+6\ 823.01\text{AD}+5.243\text{MAP}$	0.521	0.000
	$\text{MBC}=-10\ 655.8+6\ 860.9\text{AD}+5.32\text{MAP}-52.2\text{PM}$	0.584	0.000
MBN ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	$\text{MBN}=-701.5+0.04\text{ELE}+444.2\text{AD}+0.34\text{MAP}$	0.453	0.000
MBP ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	$\text{MBP}=51.5-1.3\text{PM}-10.9\text{MAT}+0.023\text{AT10}+0.01\text{MAP}$	0.620	0.000

MAT: 年均温; AT10: ≥ 10 积温; MAP: 年均降水量; AD: 干燥度; PM: 母质; ELE: 海拔; MBC: 土壤微生物生物量碳; MBN: 土壤微生物生物量氮; MBP: 土壤微生物生物量磷。MAT: mean annual temperature; AT10: accumulated temperature above 10 ; MAP: mean annual precipitation; AD: aridity; PM: parent material; ELE: altitude; MBC: soil microbial biomass C; MBN: soil microbial biomass N; MBP: soil microbial biomass P.

42.4 和 5.6, 而本研究 MBC/MBN、MBC/MBP 和 MBN/MBP 均值分别为 11.07 ± 2.25 、 92.31 ± 36.08 和 8.43 ± 3.01 , 与全球均值相比均偏高。这可能是由于川西平原内, 土壤有机质含量较高, 而氮素和磷素相对缺乏, 导致土壤微生物氮、磷偏低, 从而 MBC/MBN、MBC/MBP 和 MBN/MBP 比值较高。

3.2 环境因素对土壤微生物生物量碳氮磷变化的影响

土壤微生物生物量高低是表征土壤碳氮磷循环的重要指标, 直接关系到土壤中重要的生物化学过程及供给植物养分的能力, 其在土壤中含量受多重因素影响^[29-30]。

MBC 作为土壤活性碳的一部分, 是土壤有机物分解的动力, 与土壤中元素循环密切相关^[30]。相关分析和冗余分析结果均表明, 本研究区土壤 MBC 受年均温、 ≥ 0 积温、海拔、干燥度影响显著 ($P < 0.01$), 分别与年均温和 ≥ 0 积温呈负相关, 而与海拔、干燥度呈正相关。逐步回归分析表明, 土壤 MBC 可以分别由两个模型表达, 年均温、干燥度、年均降水量和母质是土壤 MBC 的主要影响因素。其中, MBC 含量随年均温的增加而减少, 可能是由于温度升高直接影响土壤微生物生长, 也可能温度间接通过促进作物生长而加剧其与微生物的养分竞争, 进而抑制微生物活性^[31-32]。这与刘秉儒^[9]研究贺兰山区 MBC 和年均温呈显著负相关的结果相似, 而与 Li 等^[11]在韩国首尔研究土壤 MBC 随温度的增加而增加的结果相反。其次, 因为本研究区为湿润气候, 干燥度增加有利于改善土壤通气状况, 促进微生物活动加强, 从而导致 MBC 含量增加。同时, 成土母质通过影响土壤的生物化学性质和养分^[22], 从而影响着土壤 MBC 含量。

与皮尔森相关分析和冗余分析的结果相反, 逐步回归分析显示本研究的年均降水量与土壤 MBC 呈正相关。该结果与 Li 等^[11]在韩国首尔研究中发现的

MBC 随着降水增加而增加的结果相似。这是由于本研究区, 雨热同季, 6—9 月气温多在 $20\sim 31$, 极端高温甚至高达 39.5 ; 同期降水占全年的 $45\%\sim 57\%$ 。因此, 在短时期内, 降水增加既能减缓较高气温对土壤微生物的抑制作用, 又有利于土壤有机质的保持。而在单因素分析中忽略了降水通过调控气温而呈现的正向作用。

MBN 作为土壤活性氮的重要来源, 对土壤氮素的供给起着调节作用^[28]。相关分析和冗余分析结果表明, 海拔是 MBN 的主要影响因素, 与其呈极显著正相关, 这与单因素分析的结论相同。逐步回归分析表明, 海拔、干燥度和年均降水量是 MBN 的主要影响因素, 三者均与 MBN 呈显著正相关。3 种分析方法的结果均表明, 土壤 MBN 随着海拔升高而增加, 这与刘秉儒^[9]在贺兰山区的研究结果相同, 这是由于海拔的增加, 使气温下降, 同时降低了土壤有机质矿化速率, 有利于有机质的累积, 从而导致土壤 MBN 的增加。

MBP 作为土壤有效磷的重要来源, 很大程度上能反映土壤活性磷的周转强度^[25]。相关分析和冗余分析结果表明, 母质是影响 MBP 的主要因素 ($P < 0.01$)。而逐步回归分析则表明, 土壤 MBP 分别与母质和年均温呈显著负相关, 而与 ≥ 10 积温和年均降水量分别呈显著正相关。因此, 这四者都是影响土壤 MBP 的主要因素。首先, 由于土壤磷素主要来源于母质, 不同母质土壤磷素的组成和数量皆有变异, 从而影响土壤微生物的种类和 MBP 含量。其次, 土壤 MBP 随年均温的增加而减少, 这与 Li 等^[4]对全球森林生态系统研究中 MBP 与年均温呈负相关的结果相同。这可能是由于温度增加促进了作物生长, 从而使其与土壤微生物的竞争作用加剧, 抑制了微生物活动^[31]。然而, 在逐步回归分析中, ≥ 10 积温和年均降水量与 MBP 呈显著正相关, 这均与单因素回归分析和冗余分析结果相反。可能是由于 ≥ 10 积温是影响植物生长的主要影响因素, 调控

着植物和微生物在土壤-植物系统中竞争和转化养分的过程, 从而影响土壤MBP含量。

综上, 年均温、干燥度、年均降水量和母质是MBC的主要环境影响因素; 海拔、干燥度和年均降水量是MBN的主要环境影响因素; 母质、年均温、 ≥ 10 积温和年均降水量是MBP的主要环境影响因素。表明MBC、MBN和MBP均受气候影响显著, 即它们对气候变化的响应敏感。迄今, 已有的研究主要关注年均温和年均降水量对土壤MBC和MBN的影响, 而本研究结果表明, 干燥度对土壤MBC和MBN的影响也是显著的。特别值得关注的是, 本研究中年均降水量在多环境因素影响下与MBC、MBN和MBP的关系均为正相关, 且 ≥ 10 积温与MBP呈正相关, 它们均与单因素回归分析和冗余分析的研究结果相反。这可能是由于上述几种气候因素间是存在相互影响的, 它们对土壤微生物生物量的影响既有直接效应, 也可能有间接效应和交互效应。因此, 评估这些因素与土壤MBC、MBN和MBP的关系, 必须系统观察它们在多因素影响条件下的综合效应, 而不能仅仅只调查它们的单因素影响效应。同时, 这些结果是否正确及其适应范围也需要进行更多的研究论证。

4 结论

1) 不同土壤类型间的MBC、MBN和MBP含量差异显著, 表现为冲积土的MBC、MBN和MBP含量显著高于潮土、水稻土和黄壤($P < 0.05$)。水稻土的MBC/MBN显著低于潮土, 而不同土壤类型间的MBC/MBP和MBN/MBP差异均不显著。

2) 基于多元分析的综合分析表明, MBC 的主要响应变量为年均温、干燥度、年均降水量和母质, MBN 主要受海拔、干燥度和年均降水量的综合影响, MBP 则主要受母质、年均温、 ≥ 10 积温和年均降水量调控。因此, 气候因素在土壤微生物生物量碳、氮、磷含量调控过程中扮演着重要作用。

参考文献 References

- [1] POWLSON D S, PROOKES P C, CHRISTENSEN B T. Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total soil organic matter due to straw incorporation[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19(2): 159-164
- [2] HE Z L, YANG X E, BALIGAR V C, et al. Microbiological and biochemical indexing systems for assessing quality of acid soils[J]. *Advances in Agronomy*, 2003, 78: 89-138
- [3] 郭振, 王小利, 徐虎, 等. 长期施用有机肥增加黄壤稻田土壤微生物量碳氮[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(5): 1168-1174
- [4] GUO Z, WANG X L, XU H, et al. A large number of long-term application of organic fertilizer can effectively increase microbial biomass carbon and nitrogen in yellow paddy soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(5): 1168-1174
- [5] LI P, YANG Y H, HAN W X, et al. Global patterns of soil microbial nitrogen and phosphorus stoichiometry in forest ecosystems[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2015, 23(9): 979-987
- [6] MUKHERJEE S, TRIPATHI S, MUKHERJEE A K, et al. Persistence of the herbicides florasulam and haloxyfop-methyl in alluvial and saline alluvial soils, and their effects on microbial indicators of soil quality[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2016, 73: 93-99
- [7] JU C, XU J, WU X H, et al. Effects of myclobutanil on soil microbial biomass, respiration, and soil nitrogen transformations[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 208: 811-820
- [8] 刘定辉, 舒丽, 陈强, 等. 秸秆还田少免耕对冲积土微生物多样性及微生物碳氮的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2011, 17(2): 158-161
- [9] LIU D H, SHU L, CHEN Q, et al. Effects of straw mulching and little- or zero-tillage on microbial diversity and biomass C and N of alluvial soil in Chengdu Plain, China[J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2011, 17(2): 158-161
- [10] YAN W D, CHEN X Y, PENG Y Y, et al. Response of soil respiration to nitrogen addition in two subtropical forest types[J]. *Pedosphere*, 2017, doi: 10.1016/S1002-0160(17)60471-5
- [11] 刘秉儒. 贺兰山东坡典型植物群落土壤微生物量碳、氮沿海拔梯度的变化特征[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(4): 883-888
- [12] LIU B R. Changes in soil microbial biomass carbon and nitrogen under typical plant communities along an altitudinal gradient in east side of Helan Mountain[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(4): 883-888
- [13] ZHANG L H, XIE Z K, ZHAO R F, et al. Plant, microbial community and soil property responses to an experimental precipitation gradient in a desert grassland[J]. *Applied Soil Ecology*, 2018, 127: 87-95
- [14] LI G L, KIM S, HAN S H, et al. Precipitation affects soil microbial and extracellular enzymatic responses to warming[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 12: 212-221
- [15] 曹瑞, 吴福忠, 杨万勤, 等. 海拔对高山峡谷区土壤微生物生物量和酶活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(4): 1257-1264
- [16] CAO R, WU F Z, YANG W Q, et al. Effects of altitudes on soil microbial biomass and enzyme activity in alpine-gorge regions[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(4): 1257-1264
- [17] DENG H, YU Y J, SUN J E, et al. Parent materials have stronger effects than land use types on microbial biomass, activity and diversity in red soil in subtropical China[J]. *Pedobiologia*, 2015, 58(2/3): 73-79

- [14] LIU D, HUANG Y M, AN S S, et al. Soil physicochemical and microbial characteristics of contrasting land-use types along soil depth gradients[J]. *Catena*, 2018, 162: 345–353
- [15] 周正虎, 王传宽. 帽儿山地区不同土地利用方式下土壤-微生物-矿化碳氮化学计量特征[J]. *生态学报*, 2017, 37(7): 2428–2436
ZHOU Z H, WANG C K. Soil-microbe-mineralization carbon and nitrogen stoichiometry under different land-uses in the Maershan region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(7): 2428–2436
- [16] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 中国气象出版社, 2006: 54–84
WU J S, LIN Q M, HUANG Q Y, et al. Measurement Method and Application of Soil Microbial Biomass[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006: 54–84
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25–97
BAO S D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agricultural Press, 2000: 25–97
- [18] 王传杰, 肖婧, 蔡岸冬, 等. 不同气候与施肥条件下农田土壤微生物生物量特征与容量分析[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(6): 1067–1075
WANG C J, XIAO J, CAI A D, et al. Capacity and characteristics of soil microbial biomass under various climate and fertilization conditions across China croplands[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(6): 1067–1075
- [19] TOMIOLO S, VAN DER PUTTEN W H, TIELBÖRGER K. Separating the role of biotic interactions and climate in determining adaptive response of plants to climate change[J]. *Ecology*, 2015, 96(5): 1298–1308
- [20] FIERER N, MCCAIN C M, MEIR P, et al. Microbes do not follow the elevational diversity patterns of plants and animals[J]. *Ecology*, 2011, 92(4): 797–804
- [21] GASTON K J. Global patterns in biodiversity[J]. *Nature*, 2000, 405(6783): 220–227
- [22] TRETTIN C C, JOHNSON D W, TODD D E. Forest nutrient and carbon pools at walker branch watershed changes during a 21-year period[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63(5): 1436–1448
- [23] SHENG R, QIN H L, O'DONNELL A G, et al. Bacterial succession in paddy soils derived from different parent materials[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15(4): 982–992
- [24] KODEŠOVÁ R, JIRKU V, KODEŠ V, et al. Soil structure and soil hydraulic properties of Haplic Luvisol used as arable land and grassland[J]. *Soil and Tillage Research*, 2011, 111(2): 154–161
- [25] 李渝, 刘彦伶, 白怡婧, 等. 黄壤稻田土壤微生物生物量碳磷对长期不同施肥的响应[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(4): 1327–1334
LI Y, LIU Y L, BAI Y J, et al. Responses of soil microbial biomass C and P to different long-term fertilization treatments in the yellow paddy soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(4): 1327–1334
- [26] 臧逸飞, 郝明德, 张丽琼, 等. 26 年长期施肥对土壤微生物量碳、氮及土壤呼吸的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(5): 1445–1451
ZANG Y F, HAO M D, ZHANG L Q, et al. Effects of wheat cultivation and fertilization on soil microbial biomass carbon, soil microbial biomass nitrogen and soil basal respiration in 26 years[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(5): 1445–1451
- [27] 刘晓蓓, 涂仕华, 孙锡发, 等. 秸秆还田与施肥对稻田土壤微生物生物量及固氮菌群落结构的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(17): 5210–5218
LIU X Q, TU S H, SUN X F, et al. Effect of different fertilizer combinations and straw return on microbial biomass and nitrogen-fixing bacteria community in a paddy soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(17): 5210–5218
- [28] XU X F, THORNTON P E, POST W M. A Global analysis of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in terrestrial ecosystems[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2013, 22(6): 737–749
- [29] 张洋, 倪九派, 周川, 等. 三峡库区紫色土旱坡地桑树配置模式对土壤微生物生物量碳氮的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22(7): 766–773
ZHANG Y, NI J P, ZHOU C, et al. Effects of configuration mode of crop-mulberry system in purple arid hillside field on SMBC and SMBN in the three gorges reservoir[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(7): 766–773
- [30] 曲成闯, 陈效民, 韩召强, 等. 生物有机肥对潮土物理性状及微生物量碳、氮的影响[J]. *水土保持通报*, 2018, 38(5): 70–76
QU C C, CHEN X M, HAN Z Q, et al. Effects of bioorganic fertilizer application on soil physical properties and microbial biomass carbon and nitrogen in fluvoaquic soil[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38(5): 70–76
- [31] HODGE A, ROBINSON D, FITTER A. Are microorganisms more effective than plants at competing for nitrogen?[J]. *Trends in Plant Science*, 2000, 5(7): 304–308
- [32] 张明乾, 韩证仿, 陈金, 等. 夜间增温对冬小麦土壤微生物量碳氮及其活性的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(11): 1464–1470
ZHANG M Q, HAN Z F, CHEN J, et al. Impact of nighttime warming on soil microbial biomass carbon/nitrogen and activity in main winter wheat cropping areas in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(11): 1464–1470