

祁连山东段不同植被下土壤养分状况研究

姜红梅, 李明治, 王 亲, 刘星星

(兰州大学 资源环境学院, 西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000)

摘 要:通过分析祁连山东段天祝县地区5种植被类型(丛生禾草草地、银露梅灌丛、青海云杉林、青海云杉—白桦混交林和白桦林)覆盖下土壤碳、氮、磷含量的变化情况,研究了不同植被对土壤养分的影响。结果表明:植被对土壤养分具有表聚效应,不同植被覆盖下的土壤0—20 cm土层养分含量显著高于20—40 cm土层($p < 0.05$),乔木林的表聚效应强于灌丛和草地。随上覆植被从草本植物到灌木再到乔木的变化,土壤有机碳、全氮、铵态氮和速效磷等养分均呈现出逐渐增加的趋势($p < 0.05$);硝态氮含量变化情况为白桦林>银露梅灌丛>青海云杉林>青海云杉—白桦混交林>丛生禾草草地,土壤全磷除白桦林下较高外,其他4种植被之间都无显著差异($p > 0.05$)。青海云杉—白桦混交林维持土壤养分平衡的能力强于其他4种植被。

关键词:祁连山; 植被; 土壤养分; 土壤—植物系统

中图分类号:S714.5

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2011)05-0166-05

Dynamics of Soil Nutrients under Different Vegetation Types in the Eastern Qilian Mountains

JIANG Hong-mei, LI Ming-zhi, WANG Qin, LIU Xing-xing

(College of Earth and Environmental Sciences, Key Laboratory of Western

China's Environmental Systems, Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: By analyzing carbon, nitrogen and phosphorus changes of 0—20 cm soil layer and 20—40 cm soil layer under the five vegetation types, we studied the effects of different vegetation on soil nutrients in Tianzhu County of the Eastern Qilian Mountain. The results indicated: vegetation can significantly improve the surface soil nutrient, and surface aggregation effect of arbor is stronger than shrub and grass. With the changes of vegetation from grass to shrub and then to arbor, soil organic carbon, total nitrogen, ammonium nitrogen and available phosphorus show a growing trend ($p < 0.05$) while there is no significant changes in soil total phosphorus. Changes in nitrate nitrogen are complex due to many factors. Taking all factors into consideration, the ability to maintain the soil nutrient balance of Qinghai spruce—birch mixed forest is stronger than the other four vegetations.

Key words: Qilian Mountains; vegetation; soil nutrient; soil—vegetation ecosystem

生态系统中,植被与土壤是一个相互作用、相互影响、相互制约、协调发展的统一系统,土壤为植被提供必要的物质基础,而植被的出现也影响着土壤的形成和发育。不同植被类型影响着土壤养分的积累、分布与循环,而土壤养分含量又是植被生长的重要影响因子^[1-2]。植被对土壤的影响主要表现在植物的枯枝落叶和死亡根系产生的有机质及根系分泌物对土壤理化性质的影响,植被防止或减轻水土流失引起的养分流失,植被对土壤营养元素的富集与再分配等作

用^[3];而土壤作为植物生存的重要环境条件之一,对植物群落结构和功能也会产生重要影响。一方面,土壤环境的差异会导致群落演替过程中物种多样性的变化^[4];另一方面,土壤作为诸多生态过程的参与者和载体,其结构和养分状况是度量生态系统功能恢复与维持的关键指标之一^[5]。在土壤养分循环中,碳、氮、磷元素作为生命元素驱动着其他养分元素的循环与转化,是养分元素循环的核心^[6-7]。因此,通过研究土壤养分的动态变化,对了解不同植被类型土壤肥力

和营养元素循环机制具有重要意义。不同学者对不同气候带不同植被类型下的土壤养分效应开展了大量研究^[8-14],虽然结果不尽相同,但大都认为在植被恢复演替的过程中,土壤养分含量逐渐升高,土壤性质向有利于植被恢复的方向发展。如 Jia 等^[15]对子午岭次生林的研究表明,随着演替的进程,土壤中的有机碳、全氮、微生物量碳氮含量迅速增加。群落内物种的变化是影响土壤物理、化学与生物特性的重要因素。不同森林植被类型下,土壤化学性质与养分状况不尽相同^[16],其对土壤理化和生物学性质影响显著^[17]。

祁连山东段地区地处青藏、蒙新、黄土三大高原交汇带,具典型的高寒半干旱气候特征,气候湿润,植物资源种类丰富,植被和土壤的垂直变化明显。山地森林草原植被带是研究区主要的植被分布带,与上下限的灌丛构成祁连山水源涵养林生态系统的主体,是下游地区特别是石羊河流域与黄土高原西部地区重要的生态屏障。近年来由于森林砍伐、过度放牧、开矿挖药和开荒种植,天然植被破坏严重,水源涵养能力降低,生态调节功能减弱。其中土壤侵蚀的加剧严重地影响着土壤的物理、化学特性,使得土壤肥力退化,对生态环境造成严重威胁。而较好的植被覆盖可以有效地防控水土流失。但目前对于祁连山不同植被下的土壤养分状况研究却很少见于报道。基于此,本文通过分析天祝县地区典型植被群落下不同层次土壤养分的变化,探讨不同植被对土壤养分含量的

影响和对土壤养分有效性的影响等问题,以期为中国西北地区生态环境恢复、植被建设与管理提供一定的措施依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于祁连山东段的天祝县,样地位置位于 36°55′—36°59′N、102°34′—102°43′E、海拔 2 446~2 844 m。该区气候寒冷潮湿,年平均气温-0.1℃,1 月均温-18.3℃,7 月均温 12.7℃,>0℃ 年积温 1 380℃,水热同期,年日照时数 2 600 h;年降水量 400~420 mm,集中于 7—9 月 3 个月,年蒸发量 1 590~1 600 mm,属大陆性寒温带半湿润半干旱气候区。主要发育的土壤类型为分布在阴坡、半阴坡的森林灰褐土和分布在阳坡的山地栗钙土。天然植被类型中乔木林主要有青海云杉(*Piceacrassifolia*)林、白桦(*Betula platyphylla*)林、红桦(*Betula albo-sinensis*)林以及它们的混交林;灌丛主要由金露梅(*Potentilla fruticosa*)、银露梅(*Pltentilla glabra*)、小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla* Lam.)、小檗(*Berberis thunbergii* DC)、野蔷薇(*Rosa multiflora* Thunb.)等灌木组成;草地植被主要有披针苔草(*Carex lanceolata* Boott)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、早熟禾(*Poa annua*)、风毛菊(*Saussurea japonica*)和烟管头草(*Carpesium cernuum* Linn.)等草本植物(表 1)。

表 1 采样点概况

植被类型	海拔/m	坡向坡度	经纬度	郁闭度	主要植被
丛生禾草草地	2482	西北坡 15°	36°55′N,102°35′E	0.9	早熟禾、香青、披针苔草
银露梅灌丛	2803	北坡 25°	36°57′N,102°40′E	0.9	银露梅
青海云杉林	2446	西北坡 25°	36°55′N,102°34′E	0.7	青海云杉、银露梅、披针苔草
青海云杉—白桦林	2844	北坡 25°	36°58′N,102°42′E	0.5	白桦、青海云杉、披针苔草
白桦林	2840	北坡 18°	36°58′N,102°40′E	0.2	白桦、烟管头草、披针苔草

1.2 样地选取与样品采集

供试土样于 2008 年 8 月 27—28 日取自天祝县炭山岭镇。根据不同植被覆盖情况选取五块典型样地,分别为:丛生禾草草地、银露梅落叶灌丛、青海云杉常绿针叶林、青海云杉—白桦针阔混交林和白桦落叶阔叶林。为了降低环境因子的影响,我们选取的样地空间邻近、坡度坡向相似,因此各样地间的温度、降水等环境影响基本一致。在每块样地上根据均匀分布的原则布置 6 个样点,利用土钻法分层(0—20 cm 和 20—40 cm)取样,将同层的土样混合均匀并去除植物根系和石块带回实验室,风干后过筛用于土壤养分的测定。

1.3 测定项目与分析方法

土壤有机碳(SOC)、全氮(STN)在元素分析仪(CHNS—analyser, Elementar Vario EL, Elementar Analysensysteme GmbH, Hanau, Germany)上测定;铵态氮(NH₄—N)、硝态氮(NO₃—N)采用氯化钾浸提流动注射分析仪法测定;全磷(STP)采用 HClO₄—H₂SO₄ 钼锑抗比色法测定,速效磷(SAP)采用 Olsen 法测定。各个样地土壤养分参数值为 3 次重复的平均值。数据经过 Excel 2003 电子表格软件整理后采用 SPSS 16.0 进行分析,用最小显著差异法(LSD)进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 土壤养分的剖面分布特征

不同植被覆盖下的土壤碳、氮、磷的剖面分布具有明显的层次性,养分含量总体上表现为表层(0—20 cm)高于底层(20—40 cm),反映了植被对土壤养分的表聚效应^[18]。除了部分植被覆盖下的土壤全磷、铵态氮上下层含量差异不显著外,其他各养分含量均表现为上层显著高于下层($p<0.05$,表 2—3)。植物根系要从土壤中大量吸收养分以保证植物生长的营养需要,同时植物吸收的养分又主要以凋落物的形式归还给土壤,由于研究区气候寒冷,凋落物分解缓慢,在土壤表层积累较多,这些因素共同作用导致了土壤养分的表聚。由于不同植物的生物学特征不同,使得其凋落物的质和量及分解速率都有较大差异^[19],所以不同植被对土壤养分的表聚效应是不同的。以土壤有机碳为例,丛生禾草覆盖下,表层含量比底层含量高 35.6%,而乔木林下平均为 48.5%,说明乔木林的养分表聚效应强于丛生禾草草地的养分表聚效应。由于草地地表凋落物很少,有机质大部分来自于死

亡根系腐解及根系分泌物,所以其养分表聚效应很有限。

2.2 不同植被对土壤有机碳含量的影响

土壤有机碳是土壤养分循环转化的核心,其含量变化是不同植被类型、土地利用方式下土壤质量演变的重要标志^[20]。从表 2 看出,不同植被覆盖下土壤有机碳含量差异显著($p<0.05$),依次为青海云杉—白桦林>白桦林>青海云杉林>银露梅灌丛>丛生禾草草地,呈现从草地到灌丛再到乔木林逐渐上升的趋势。丛生禾草草地,由于地表凋落物很有限,所以土壤有机碳含量最低,为 26.04 g/kg。随着植被的演替,以枯枝落叶和死亡根系等形式归还到土壤中的有机质数量不断增加,土壤有机碳含量也相应升高,反映了植被演替能够显著促进土壤有机碳的积累。在不同乔木覆盖下,土壤有机碳含量表现为青海云杉—白桦林稍高于白桦林,二者均远大于青海云杉林。相较于青海云杉的凋落物,白桦的枯枝落叶更容易分解。至于青海云杉—白桦林覆盖下的有机碳含量稍高于白桦下的有机碳含量,可能因为相较于其他植被类型,白桦林的郁闭度低,有机碳矿化消耗较高所致。

表 2 不同植被下的土壤有机碳、全氮、全磷含量

g/kg

植被类型	有机碳			全氮			全磷		
	0—20 cm	20—40 cm	平均	0—20 cm	20—40 cm	平均	0—20 cm	20—40 cm	平均
丛生禾草草地	29.97a	22.10b	26.04E	4.17a	2.45b	3.31E	0.91a	0.90a	0.91B
银露梅灌丛	36.87a	27.43b	32.15D	5.44a	3.84b	4.64C	0.96a	0.86b	0.91B
青海云杉林	39.47a	26.63b	33.05C	5.21a	3.39b	4.30D	0.98a	0.90b	0.93B
青海云杉—白桦林	58.52a	39.46b	48.99A	6.92a	4.32b	5.62B	0.96a	0.93a	0.94B
白桦林	57.30a	38.47b	47.88B	8.57a	5.59b	7.08A	1.13a	1.13a	1.13A

注:表中同列不同大写字母表示不同植被间差异显著($p<0.01$),同行不同小写字母表示同一样地上下土层差异显著($p<0.05$),下表同。

表 3 不同植被覆盖下土壤速效氮、速效磷含量

mg/kg

植被类型	硝态氮			铵态氮			速效磷		
	0—20 cm	20—40 cm	平均	0—20 cm	20—40 cm	平均	0—20 cm	20—40 cm	平均
丛生禾草草地	2.15a	2.07a	2.11E	10.56a	7.89b	9.23E	9.70a	6.18b	7.95E
银露梅灌丛	7.14a	5.15b	6.15B	14.22a	13.03a	13.62D	12.95a	10.03b	11.49D
青海云杉林	7.71a	3.39b	5.55C	21.03a	19.81a	20.42A	15.42a	10.88b	13.15C
青海云杉—白桦林	3.12a	3.33a	3.23D	18.06a	17.31a	17.69B	19.00a	16.22b	17.61A
白桦林	8.47a	5.01b	6.73A	16.70a	15.12a	15.91C	17.88a	13.07b	15.48B

2.3 不同植被对土壤全氮、速效氮含量的影响

土壤全氮含量是衡量土壤氮素供应状况的重要指标,不同植被覆盖下土壤全氮含量依次为白桦林>青海云杉—白桦林>银露梅灌丛>青海云杉林>丛生禾草草地,各植被间差异显著($p<0.05$,表 2—3)。土壤氮素主要分布于土壤有机质中,土壤全氮含量的变化取决于有机质含量的变化^[21]。从草地到灌丛再到乔木林,地表枯枝落叶层的分解补充与累积不断增加,从而使得土壤全氮含量随之升高。青海云杉林下

的土壤全氮含量低于银露梅灌丛下的土壤全氮含量,是因为青海云杉的枯枝落叶不易分解所致。就乔木林而言,土壤全氮含量表现为白桦林下显著高于青海云杉林和青海云杉—白桦林,一方面是由于阔叶林会产生大量容易分解的枯枝落叶,另一方面是针叶林下氮素矿化作用较强,大量有机氮被转化成了无机氮,土壤铵态氮变化情况与全氮相反,佐证了上述推论。

土壤中的速效氮主要以铵态氮(NH_4-N)和硝态氮(NO_3-N)的形式存在,它们是植物从土壤中吸

收氮素的主要形态。不同植被下,土壤铵态氮和硝态氮含量都有显著变化($p < 0.05$),但二者的变化情况差异较大(表3)。就速效氮的组成而言,铵态氮占了很大的比例,其占速效氮含量的百分数最低为银露梅灌丛下的68.9%,最高为青海云杉—白桦林下的84.6%,这是由于研究区土壤呈微酸性、氨化作用较强而硝化作用相对较弱所致。铵态氮含量基本随草地到灌丛再到乔木林的演替而增加,在青海云杉林下最高为20.42 mg/kg。虽然硝态氮有随植被演替而增加的趋势,但在青海云杉林和青海云杉—白桦混交林下却显著低于白桦林甚至低于银露梅灌丛下的含量,在青海云杉—白桦林下仅为3.23 mg/kg。有试验表明,营养需求量低的针叶树通常喜好铵态氮^[22],为了满足对铵态氮的需求,青海云杉有可能通过某种机制抑制了其林下土壤中硝化细菌的硝化作用,从而降低了硝态氮的含量;同时研究区针叶林下的地表植被覆盖不如阔叶林,土壤侵蚀较阔叶林严重,导致硝态氮流失也较多。此外,土壤氧气充足有利于铵态氮的氧化从而增加土壤硝态氮含量,由于白桦林的凋落物量大且容易分解,其下的土壤结构要比针叶林下疏松,有利于硝态氮的生成。以上因素共同作用造成了青海云杉林和青海云杉—白桦林下土壤铵态氮含量高而硝态氮含量低的结果。

2.4 不同植被对土壤全磷、速效磷含量的影响

磷是一种沉积性矿物,在主要植物营养元素中,磷在风化壳中的物质迁移是最小的。表2显示,除白桦林外,土壤全磷含量在其他植被下无显著差异,表明不同植被对土壤全磷含量的影响不明显。土壤全磷含量主要受土壤母质和成土作用的影响,白桦林可能由于其较大的枯枝落叶量,导致全磷含量高于其他植被覆盖下的土壤。植物生长需要的是速效磷而不是全磷,不同植被覆盖下土壤速效磷含量差异显著($p < 0.05$),表现出与土壤有机碳完全一致的变化趋势(表3)。相关分析表明二者有极显著的正相关关系($R = 0.940^{**}$, $p < 0.01$),不同植被对速效磷的影响机理应与有机碳相似。土壤中的磷被植物吸收之后又以凋落物的形式归还土壤,相比于草地,灌丛与乔木林速效磷高,与其有较厚的腐殖质层,土壤微生物含量高,矿化分解全磷的能力较强有关。而乔木林中青海云杉林下速效磷含量最少,与针叶林对速效磷的消耗较大有关。

3 讨论

径流、淋溶损失是养分从土壤—植物生态系统中流失的主要途径之一。研究区主要发育的山地栗钙

土和森林灰褐土,成土过程中腐殖质积累过程较为强烈,加之该区降水量小,淋溶过程较弱,从而使土壤养分累积在土壤表层。在同一气候和土壤条件下,所覆盖的植被类型不同,土壤的理化性质有差异,反映了土壤特性除了与其成土母岩、气候和自然理化性质有密切关系外,植被的作用也不可忽视^[23]。植被对土壤养分具有表聚效应,而土壤养分的表聚为地表植被的生长提供了丰富的营养元素,使地表的覆盖度增加,有效地减轻了土壤侵蚀,降低了土壤养分的流失,从而表现出植被与土壤相互促进的循环演替进程。

土壤有机碳和全氮作为土壤微生物的能量和细胞构成要素,二者含量的多少会影响土壤中微生物的数量,从而影响土壤养分的长期积累和植物生长。对不同植被覆盖下的土壤有机碳与全氮进行线性分析,回归方程为 $y = 0.1268x + 0.2185$, $R^2 = 0.8141$ (y ——土壤全氮; x ——土壤有机碳)。土壤全氮含量随土壤有机碳的增加而升高,充分证明有机质的积累对土壤有机碳和全氮含量具有重要影响。不同植被对土壤铵态氮、硝态氮和速效磷等速效养分的影响与对土壤有机碳的影响基本相似,虽然受不同植被养分吸收差异以及养分本身流失潜力不同等因素的影响,各速效养分的变化情况互有不同,但总的变化趋势大体一致,说明土壤有机碳在维持土壤养分库、提高土壤养分有效性方面起着重要作用^[24]。硝态氮是土壤—植物系统中流失潜力最大的速效养分。本研究中,青海云杉林通过抑制硝化作用使土壤铵态氮占优势,对于促进林下土壤肥力,防止氮素流失具有重要的现实意义。但青海云杉的凋落物分解缓慢,对于有机质的输入有一定的限制作用;而白桦林由于林下容易分解的大量枯枝落叶,可为土壤提供丰富的有机质,但其林下土壤硝态氮含量最高,因此养分流失的潜力也最大;而青海云杉—白桦混交林下的土壤硝态氮含量在乔木林中最低,且其他养分含量也不逊于青海云杉林和白桦林;另外,青海云杉林对速效磷的消耗较大,使林下土壤速效磷含量较其他林相相对匮乏。综上,青海云杉—白桦混交林树种优势互补,提高了物种的多样性,增强了土壤—植被系统的稳定性,使土壤养分保持较高的平衡状态,有效防止了土壤质量的退化,所以其养分效应要强于本研究中的其他植被。

4 结论

(1)不同植被覆盖下0—20 cm土层土壤养分含量显著高于20—40 cm土层,植被对土壤养分具有表聚效应,受凋落物量等因素的影响,乔木林的表聚效应强于灌丛与草地。

(2)植被演替有助于土壤养分的积累,表现为随着上覆植被从草本植物到灌丛再到乔木的变化,土壤有机碳、全氮、铵态氮和速效磷等养分均呈现出逐渐增加的趋势;植被对土壤全磷影响不大。

(3)青海云杉—白桦混交林在对土壤养分的积累以及维持土壤养分的平衡状态方面要强于本研究中的其他植被。通过人工调节的手段来促进混交林的保护和更新,可使生态系统的物质得以良性循环。

参考文献:

- [1] McQuilkin W E. The natural establishment of pine in abandoned fields in the Piedmour Plateau Region [J]. Ecology, 1940, 21(2): 135-147.
- [2] 戴全厚, 刘国彬, 张健, 等. 黄土丘陵区植被次生演替灌木种群的土壤养分效应[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2006, 38(8): 125-131.
- [3] 王国梁, 刘国彬, 许明祥. 黄土丘陵区纸坊沟流域植被恢复的土壤养分效应[J]. 水土保持通报, 2002, 22(1): 1-5.
- [4] Tilman D, Knops J, Wedin D. The influence of functional diversity and composition on ecosystem processes [J]. Science, 1997, 277(12): 1300-1302.
- [5] 吴彦, 刘庆, 乔永康. 亚高山针叶林不同恢复阶段群落物种多样性变化及其对土壤理化性质的影响[J]. 植物生态学报, 2001, 25(6): 648-655.
- [6] Orazinska D L, Bardgett R D, Blauw M B, et al. Relationships at the above ground below ground interface: plants, soil biota, and soil processes [J]. Ecological Monographs, 2003, 73(3): 377-395.
- [7] Pablo L P, Vernica G, Pastur G M. Above-and below ground nutrients storage and biomass accumulation in marginal *Nothofagus antarctica* forests in Southern Patagonia [J]. Forest Ecology and Management, 2008, 255(7): 2502-2511.
- [8] 张红, 吕家珑, 赵世伟, 等. 不同植被覆盖下子午岭土壤养分状况研究[J]. 干旱地区农业研究, 2000, 24(2): 66-69.
- [9] 陈海霞, 付为国, 王守才, 等. 镇江内江湿地植物群落演替过程中土壤养分动态研究[J]. 生态环境, 2007, 16(5): 1475-1480.
- [10] 张庆费, 宋永昌, 由文辉. 浙江天童植物群落次生演替与土壤肥力的关系[J]. 生态学报, 1999, 19(2): 174-178.
- [11] 阿守珍, 卜耀军, 温仲明, 等. 黄土丘陵区不同植被类型土壤养分效应研究: 以安塞纸坊沟流域为例[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(6): 58-62.
- [12] 宋洪涛, 张劲峰, 田昆, 等. 滇西北高山地区黄背栎林植被演替过程中的林地土壤化学响应[J]. 西部林业科学, 2007, 36(2): 65-70.
- [13] 王韵, 王克林, 邹冬生, 等. 广西喀斯特地区植被演替对土壤质量的影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21(6): 130-134.
- [14] 安韶山, 刘梦云, 李壁成, 等. 宁南山区不同植被恢复措施的土壤养分效应研究[J]. 西北植物学报, 2003, 23(8): 1429-1432.
- [15] Jia Guo-mei, Cao Jing, Wang Chunyan, et al. Microbial biomass and nutrients in soil at the different stages of secondary forest succession in Ziowulin, northwest China [J]. Forest Ecology and Management, 2005, 217: 117-125.
- [16] 周永斌, 张飞, 殷鸣放, 等. 白石砬子自然保护区不同森林类型土壤化学性质与养分状况分析[J]. 中国农学通报, 2010, 26(11): 118-122.
- [17] 任丽娜, 海燕, 丁国栋, 等. 华北土石山区人工林土壤健康评价研究[J]. 水土保持学报, 2004, 24(6): 46-52, 59.
- [18] 巩杰, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 黄土丘陵区小流域植被恢复的土壤养分效应研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1): 93-96.
- [19] 郑颖吴. 论喀斯特林区概论[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [20] 唐灿, 孟晖. 河西走廊地区荒漠化问题分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1999, 10(4): 47-55.
- [21] 黄瑞农. 环境土壤学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1994.
- [22] Gosz J R. Nitrogen cycling in coniferous ecosystems [M]//Clark F E, Rosswall T. Terrestrial Nitrogen Cycles. Ecol. Bull. (Stockholm), 1981, 33: 405-426.
- [23] 曲国辉, 郭继勋. 松嫩平原不同演替阶段植物群落和土壤特性的关系[J]. 草业学报, 2003, 12(1): 18-22.
- [24] Li F M, Song Q H, Pattick K J, et al. Dynamics of soil microbial biomass C and soil fertility in cropland mulched with plastic film in a semiarid agro-ecosystem [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, 36(11): 1893-1902.