

酸雨对土壤有机碳转化和固持的研究进展

赵金金, 黄显怀, 钱婧

(安徽建筑大学 环境污染控制与废弃物资源化利用安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230601)

摘要: 由于城市发展的速度加快, 酸雨的频率和强度逐渐增加, 对土壤生态系统的危害日益严重。本文在酸雨对土壤有机碳含量的影响和土壤有机碳转化机理的基础上, 总结了酸雨对土壤生态系统影响的相关研究成果, 包括以下几个方面: (1) 酸雨对土壤养分矿化的影响; (2) 酸雨对土壤团聚结构的作用; (3) 酸雨对土壤碳 (C)、氮 (N)、磷 (P) 等养分元素的平衡关系。由于研究区域的气候、土壤类型及耕作方式等因素不同, 酸雨对土壤碳固持的影响存在巨大差异, 今后应加强从以下几个方面进行扩展实验: (1) 多种因素耦合关系研究; (2) 不同的酸雨类型组合研究; (3) 现场长期定位监控。

关键词: 土壤有机碳; 碳循环; 碳矿化; 土壤团聚结构

中图分类号: S154.1

文献标识码: A

文章编号: 2095-8382 (2021) 04-052-06

Research Progress on Conversion and Retention of Organic Carbon in Soil by Acidic Rainfall

ZHAO Jinjin, HUANG Xianhuai, QIAN Jing

(Anhui Provincial Key Laboratory of Environmental Pollution Control and Resource Reuse, Anhui JianZhu University, Hefei 230601, China)

Abstract: The frequency and intensity of acid rain have gradually increased with the acceleration of urbanization and industrialization, seriously threatening soil ecosystems. In the study, the impact of acid rain on soil organic carbon content and mechanism of soil organic carbon conversion as an entry point related to soil ecosystems are summarized, including the following aspects: 1) The impact of acid rain on soil nutrient mineralization, 2) the role of acid rain on soil aggregate structures and 3) the function of acid rain on the balance of soil nutrient elements, including carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P). Due to the study area's varying climates, soil type, and tillage methods, the effects of acid rain on soil carbon sequestration differ significantly. Future experiments should focus on the following aspects: 1) research on the coupling relationship of multiple factors; 2) research on the combination of different acid rain types, and 3) long-term site positioning monitoring.

Keywords: Soil organic carbon; Carbon cycle; Carbon mineralization; Soil agglomeration structure

酸雨是全球都正在面临的生态环境问题。自然与人的某些行为方式都会产生酸雨现象, 自然主要是通过生物腐烂、海洋雾沫、火山爆发、闪电和细菌分解等方式产生酸雨, 但其中最主要的原因是人

为排放大量的酸性物质。中国是继欧洲、北美之后的第三大酸雨区^[1]。由于对酸雨的研究分析还不够深入, 酸雨所产生的环境污染日趋严重, 它对人类生活和环境所产生的影响受到了广泛的关注。

收稿日期: 2020-12-08

基金项目: 安徽省科技重大专项计划项目 (17030801028); 安徽省高校省级自然科学基金项目 (KJ2019A0754); 安徽建筑大学引进人才及博士启动基金项目 (2018QD13)

作者简介: 赵金金 (1995-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 水处理理论与技术。

近年来,我国酸雨的污染随着治理和人为控制取得了一定成效。由于土壤是酸雨的直接受体,它会通过抑制土壤呼吸、土壤微生物和酶的活性导致CO₂排放量减少^[2],从而对全球碳循环产生影响。此外,酸雨还会通过阻碍土壤中植物根系吸收所需营养元素^[3]打破土壤中碳、氮、磷元素的平衡关系。酸雨所产生的影响不容忽视,因此,需要加强对酸雨历史特征的变化进行深入分析,采取相应的措施保护环境、减少污染、降低经济损失。

1 土壤中的碳

1.1 土壤中碳的种类及作用

陆地生态系统中的最大碳库是土壤碳库,也是全球最重要的自然碳库之一^[4],其包括1 550 Gt (1 Gt=1×10⁹吨)土壤有机碳和950 Gt土壤无机碳。储量分别约为植被碳库的3–4倍(约550 Gt)。由于土壤碳的微小变化会引起大气中二氧化碳浓度的显著变化,影响全球碳平衡以及生态系统的稳定性,进而导致全球气候变化。因此,了解土壤碳及其动态变化对土壤碳素的固持、生态系统碳循环都具有重要的意义。土壤中的碳可分为有机碳(Soil organic carbon, SOC)和无机碳(Soil inorganic carbon, SIC),其中土壤SIC主要由土壤原生和次生碳酸盐两种形态的碳组成,大面积固存于碳酸岩母质中。因SIC循环周期长(千年尺度),在短期碳循环(百年尺度)中的作用微弱。目前对SIC的研究相对较少,而更多地集中于SOC的相关研究。

有机碳库是随着土壤中物质输入和输出的相对大小的变化而发生变化的。此外,碳源物质在土壤中的分解、储存和转化之间存在密切联系^[5]。依据物理化学性质的不同, SOC可分为不同类型,例如,根据土壤复合体颗粒的大小,可将SOC分为颗粒有机碳(POC, 53–2 000 μm)和粘粒有机碳(COC, <53 μm)^[6];根据密度大小,可分为轻组有机碳(LFOC)^[7]和重组有机碳(HFOC)^[8];根据SOC化学组分不同可分为溶解性有机碳(DOC)、酸水解性有机碳(AHOC)和易氧化有机碳等(EOC)^[9]。SOC不仅是土壤最基本的结构单元、构成土壤团聚体的胶结物质,而且在土壤肥力中它也极其重要,是评价土壤质量的重要指标^[10]。SOC含量增加,能够节约土壤水分、提高肥料性能、提高

土壤肥力。此外,土壤阳离子交换量(CEC)和土壤团聚体结构都能得到改善。SOC在土壤微生物活动的供应方面也发挥着积极的作用,促进陆地生态系统中的碳及其它土壤养分元素及物质的分解、转化与循环过程^[11]。由于SOC对土壤肥力、作物产量和生态环境起着重要作用,因此,探究土壤中的有机物质转化过程和SOC功能一直都是土壤科学的研究热点。

1.2 土壤中的碳循环

地球碳循环过程是指碳在水圈、大气圈、生物圈以及岩石圈之间以CO₃²⁻(以CaCO₃, MgCO₃为主)、HCO₃⁻、二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)、(CHO)_n等形式转换和运移的过程。由于土壤是连接水圈、大气圈、岩石圈以及生物圈的纽带。因此,研究地球生态系统的碳循环过程,首先需要弄清土壤中的碳循环过程。总体来说, SOC主要来源是动植物残体,经土壤微生物分解转化后形成CO₂等气体释放进入大气。同时,植物通过光合作用将大气中的CO₂固持在土壤中(图1),以这种方式完成SOC循环过程。

SOC的含量可视为土壤有机碳投入和分解两个过程多年平衡的表达,由于受土壤所处的环境气候和土壤地质等条件的影响, SOC含量差别较大。目前,影响土壤SOC含量的主要因素分为自然因素和人为因素两种,其中关于自然因素如气候、土壤类型、地形特征等对SOC储量影响的相关研究较多。由于城市化和工业化的高速发展,汽车拥有量的增加,导致大气中酸雨的前体物(SO₂、NO₂)等浓度增加。目前,酸雨对土壤环境的影响愈加明显。土壤系统是陆地生态系统的基本组成部分,也是酸雨的最终受体。经酸雨淋溶的土壤酸化进程会不断加剧,导致土壤微生物量中的碳含量下降和土壤呼吸速率的降低,土壤微生物的数量和群落组成结构受到影响。鉴于此,本文将针对酸雨对土壤有机碳含量及转化机制的影响进行重点阐述。

2 酸雨对土壤有机碳的影响

2.1 酸雨对土壤中碳矿化影响

土壤中有有机碳的微生物降解释放和分解CO₂的过程称为碳矿化,在调节生态系统养分循环和碳循环方面起着重要作用。前期研究表明,不同的土

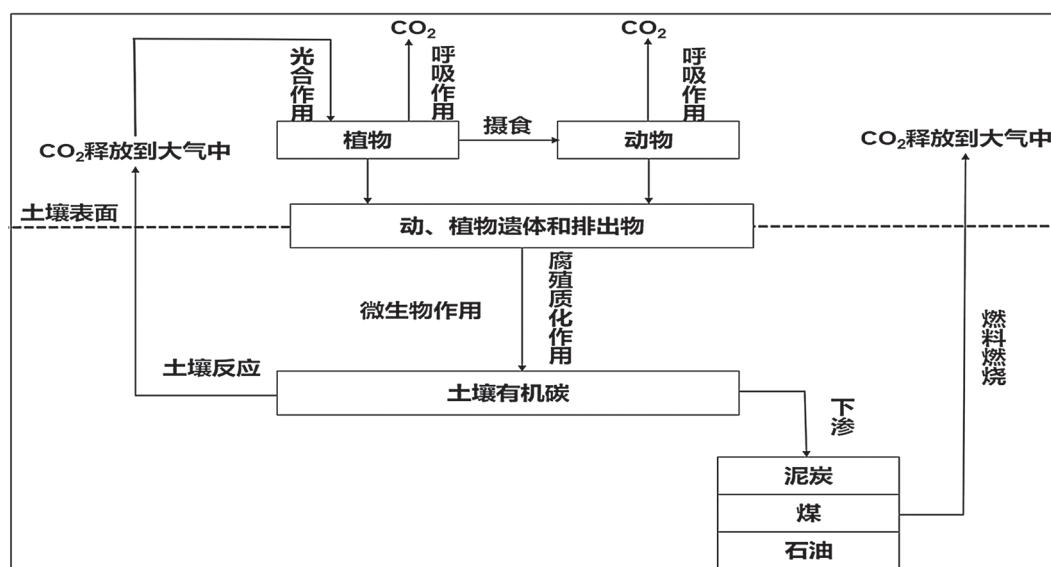


图 1 有机碳在生态系统中的循环机制

壤类型、土地利用方式和地形特征等都会在一定程度上影响土壤碳的矿化过程。土壤中有毒金属离子活性增加、土壤结构变差、土壤肥力降低现象都是由酸雨造成的土壤酸化所导致的结果。同时,酸雨改变土壤微生物的活性及抑制参与有机碳循环的土壤酶活性,包括改变土壤关键性酶的肽链构象、氨基酸残基微环境^[12],从而导致土壤微生物对碳源利用率的下降,促进土壤有机碳的累积。

酸雨对生态系统产生的危害十分严重。因此,国内外都在相继开展与酸雨相关的研究。酸沉积会改变微生物活性、酶活性和微生物种群组成。从而对土壤中碳矿化产生影响。吴杰民^[13]等研究表明,土壤酸化现象、微生物和土壤酶活性会随着酸雨的酸度增加而降低,而且抑制作用明显,影响土壤碳循环过程。根据土壤的理化学性质不同,酸雨对土壤有机碳的影响也有明显的差异。朱雪竹^[14]研究表明,在强酸性酸雨($\text{pH}=3.0$)下,酸性水稻土有机碳的分解速率比碱性和中性高的多。吴建平^[15]研究表明,短期内酸雨对于土壤碳的含量没有显著的影响,但是长期淋溶会增加土壤酸化,导致土壤微生物含量和土壤呼吸速率降低,对土壤微生物的数量和群落组成结构有一定的影响,使土壤碳含量发生变化。

综上所述,酸雨是通过影响酶的活性、改变土壤结构和微生物活动造成土壤酸化和土壤贫瘠的现象,会使土壤中有机碳含量的减少、矿化作用减

弱、阻碍农作物种子萌发、抑制农作物生长,从而诱发植物病虫害导致农作物减产,破坏农作物的品质。此外,酸沉降还会通过改变土壤有机碳的状态来减弱 SOC 的矿化过程,对全球碳循环产生影响,造成大气中 CO_2 浓度升高,从而会加剧温室效应。

2.2 酸雨对土壤团聚结构的作用

土壤团聚体是土壤中最基本的结构单位,而且是土壤中固定碳和氮的重要场所。它的稳定性与土壤有机质相关。研究表明,土壤团聚体结构稳定性会因为土壤的 pH 值而产生消极影响^[16]。许中坚^[17]研究表明,酸雨是通过调节土壤酸碱度和胶结物质对土壤团聚产生影响, $\text{Al}(\text{OH})_3$ 和 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 吸附作用随着土壤 pH 降低而降低,土壤大团聚体很难形成,团聚体的稳定性随之降低。由于土壤酸化,土壤中的酸根和氯根在土壤中大量积累, H^+ 将土壤胶体表面的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 置换出来,土壤胶体表面吸附的 H^+ 增多,土壤难以形成结构稳定的团粒结构^[18]。林琳等^[19]认为,在快速酸雨淋溶作用下,土壤 $>0.25\text{ mm}$ 团聚体 (diameter of more than 0.25 mm , $\text{DR}0.25$) 含量随着降雨酸度升高而显著减少。同时,土壤盐基流失、土壤胶体不稳定、土壤胶粒凝聚不能絮凝都是由酸雨导致的结果^[20]。酸沉降通过改变土壤的酸碱条件、土壤胶体的稳定性、土壤胶结物质的数量和性质,从而对土壤颗粒团聚和有机无机化合物产生影响^[21],其结果是团聚作用降低,粘性颗粒含量增加,导致土壤的腐蚀

性增强。

土壤团聚结构的稳定性与SOC含量关系密切。土壤团聚体的数量和大小分布是由SOC含量决定的,土壤团聚体形成结构及其稳定性又反过来作用于SOC的储存、分解和转化^[22]。赵世伟等^[23]研究结果指出,土壤团聚体粒径的增加,则土壤有机碳含量增高。由于土壤团聚体形成初期主要是土壤有机碳的粘合作用,较小粒径的团聚体经过团聚和有机碳的再分配所形成大团聚体的结构更加稳定,并对土壤中的碳起到很好的固定作用^[24]。

此外,土壤团聚体可通过其自身的特性对土壤SOC的有效性起限制作用^[25],土壤团聚体发生变化的同时也会对土壤有机碳矿化产生影响^[26],土壤中大团聚体的有机碳矿化速率是远高于微团聚体^[27]。因此,长期持续性的酸雨会导致土壤的团聚效应降低,破坏大的团聚体结构,降低其稳定性,使大团聚体难以形成,从而降低了土壤有机碳的矿化速率。今后探讨酸雨对土壤团聚体稳定性机理还需要与土壤有机碳矿化相结合进行更深一步的研究。

2.3 酸雨与土壤中碳、氮、磷元素的平衡关系

植物生长离不开土壤中的C、N和P,三者密切相关。其中,土壤中C/N比可作为土壤C、N营养平衡状况的重要预测指标^[28]。而土壤C/P比则是作为土壤有机物质释放磷和吸收固持磷素的指标^[29]。初步研究结果表明,土壤C、N、P之间有一定的平衡,土壤迁移和转化过程是相互影响、相互制约的,在此基础上提出了生态化学计量(Ecological stoichiometry)概念。

目前,关于酸雨所导致的土壤N和P流失的相关研究,学者们并没有达成统一共识。例如,Guo J H等在研究中国农田土壤酸化问题时,指出酸雨可改变土壤理化性质,破坏土壤结构,加快C、N元素的淋失,进而降低土壤肥力^[30];吴建平等^[31]进行了亚热带森林土壤有机碳对模拟降雨的早期响应研究,认为酸雨会导致土壤N含量增加,使土壤呼吸速率降低以及C释放减少,有利于C的积累;张新明等^[32]在模拟酸雨对氮素移植和酸化影响荔枝园土壤潜力的实验结果表明,土壤中不同形态的N(铵态氮、硝态氮和总氮)淋失量和磷元素的有效性会随酸雨的pH值增大而下降。此外,土

壤碳氮比、氮磷比、碳磷比、对SOC储量具有良好的指示作用。土壤C、N、P化学计量学特征对一定酸度的降水变化存在一定的响应机制。酸雨加剧土壤酸化,使得土壤的pH降低,碳氮比会显著增加,有利于土壤碳氮的积累。土壤C的分解和积累速率又会随着土壤N、P有效性降低而减小^[33]。梁国华等^[34]研究表明,当表层土壤C含量增加时,P的含量呈一定下降趋势,C/N、C/P和N/P在长期模拟酸雨条件下均呈现增加趋势;王文娟等^[35]则认为,模拟酸雨并未显著改变土壤C、N、P含量。

由于各研究地区的土壤类型、气候、土壤养分元素组成等不同,酸雨对土壤C/N/P影响的研究结果存在一定的差异性。无论酸雨是增加或减少土壤中的碳、氮或磷元素含量,都会打破这三种营养元素在土壤中的平衡关系,影响土壤中的微生物和动植物的活性。这一现象阐释了生态化学计量的概念,土壤生态系统中的C、N和P含量之间有一定的平衡。当土壤中某一元素的状态发生变化时,其他元素的分解和转化过程也会随之发生相应的改变。

3 研究与展望

目前,酸雨对土壤中碳含量和转化机理研究取得进展,但研究酸雨的理论体系不够完善,许多问题还没能够得到解决。目前的研究形式比较单一,影响研究的因素描述不够清晰。由于模拟酸雨实验研究的单一性的影响,很难评价酸雨对土壤的影响。此外,由于每个实验中采用的方法不同,研究结果可能也会有所不同,甚至相互矛盾。因此,今后研究酸雨对土壤有机碳固碳和转化影响可以从以下几个方面扩展实验:

3.1 多种因素耦合关系研究

自然界中酸雨并不是唯一会对土壤碳含量产生变化的因素。在酸沉降背景下,同时伴随着温室效应、N沉降、降水模式的改变等全球变化过程,土壤的碳循环都会随着这些问题的变化而发生变化。现有的研究更多是探讨单一变量处理对土壤所产生的影响,很少和其它因素相结合。比如:在研究酸雨对土壤中营养元素产生的影响中,有的研究认为土壤酸化会造成C、N的淋失,而有的研究却得出土壤酸化有利于N含量的增加和C的积累,这

是两种完全相反的结果。因此,今后应考虑多种因素共同作用的研究。例如:评价土壤团聚体的数量和有机碳的迁移转化能力时,应考虑与核磁共振波谱、断层射线扫描、红外光谱等技术相结合,从微观角度分析土壤中团聚体的结构和有机质的组成情况。而对土壤有机质稳定性的测评,可以从土壤中的酶、有机质、土壤微生物量碳等方面进行组合分析。这将有利于进一步总结土壤碳排放的变化趋势与规律。

3.2 不同的酸雨类型组合研究

酸雨分为硫酸、硝酸和混合酸雨三种。不同类型酸雨所含的酸性离子浓度存在差异,其中硫酸型酸雨主要的酸根离子是 SO_4^{2-} ,硝酸型酸雨主要的酸根离子则是 NO_3^- 。由于酸根离子不同,不同类型酸雨对农作物的抑制作用也存在差异。有研究表明^[36],当酸雨浓度较强时($\text{pH}<3.1$),硝酸型酸雨对农作物生长的抑制作用要大于硫酸型和混合型酸雨。而有研究表明,轻度($\text{pH}=4.5$)硝酸型酸雨对植物的促进作用要高于硫酸型酸雨,重度($\text{pH}=2.0$)硝酸型酸雨对植物的抑制作用要低于硫酸型酸雨^[37]。我国主要以燃煤为主,燃煤产物是主要的酸性物质,逐渐呈混合酸雨趋势。当酸雨的类型发生变化后,会降低农作物的产量和品质,从而对土壤中碳的含量造成影响。因此,针对不同类型的酸雨开展实验,能够为土壤中碳含量的动态变化预测研究提供科学依据。

3.3 加强现场长期定位试验的观测

自然环境是处于不断变化的过程,而室内模拟在酸雨成分、雨滴大小、降雨历时、降雨频率、温度、光照等方面都是控制在一定范围之内的,与自然降雨完全不同。但这些因素恰恰与土壤有机碳的迁移和转化息息相关,室内模拟很难反映真实状况。有研究表明^[38],野外与室内实验存在着较大的差异,主要原因就是对温度的把控不够灵活,达不到像野外实验的环境条件,这也是造成室内模拟结果理想,而运用在实际中却出现截然不同结果的主要原因。因此,要加强现场长期定位,可以降低实验的偶然性。不同位置长期定点的观测,研究结果更真实可靠。与模拟酸雨的试验相比,它能更充分地反映酸雨对土壤的影响,为保护土壤生态系统健康与安全提供理论指导。

参考文献:

- [1] Wang L, Chen Z, Shang H, et al. Impact of simulated acid rain on soil microbial community function in Masson pine seedlings[J]. *Electronic Journal of Biotechnology*, 2014, 17(5): 199–203.
- [2] 贾夏, 赵永华, 韩士杰. 全球大气 CO_2 浓度升高对土壤微生物的影响[J]. *生态学杂志*, 2007, 26(3): 443–448.
- [3] Hunter A S, Kelley O J. A new technique for studying the absorption of moisture and nutrients from soil by plant roots[J]. *Soil Science*, 1946, 62(6): 441–450.
- [4] 胡国智, 熊韬, 张炎, 等. 甜瓜主茎叶不同叶位 SPAD 值空间分布与氮素营养诊断[J]. *中国土壤与肥料*, 2017(1): 80–85, 148.
- [5] Schmidt M W I, Torn M S, Abiven S, et al. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property[J]. *Nature*, 2011, 478(7367): 49–56.
- [6] Kalbitz K, Schwesig D, Rethemeyer J, et al. Stabilization of dissolved organic matter by sorption to the mineral soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(7): 1319–1331.
- [7] Sarkhot D V, Jokela E J, Comerford N B. Surface soil carbon size–density fractions altered by loblolly pine families and forest management intensity for a Spodosol in the southeastern US[J]. *Plant and Soil*, 2008, 307(1/2): 99–111.
- [8] John B, Yamashita T, Ludwig B, et al. Storage of organic carbon in aggregate and density fractions of silty soils under different types of land use[J]. *Geoderma*, 2005, 128(1/2): 63–79.
- [9] Murphy D V, MacDonald A J, Stockdale E A, et al. Soluble organic nitrogen in agricultural soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 30(5/6): 374–387.
- [10] 叶思源, 陈展, 曹吉鑫, 等. 模拟酸雨和接种外生菌根真菌对马尾松土壤养分、土壤团聚体及有机碳组分的影响[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(4): 1141–1148.
- [11] 张维理, KOLBE H, 张认连. 土壤有机碳作用及转化机制研究进展[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(2): 317–331.
- [12] 徐冬梅, 刘广深, 许中坚, 等. 模拟酸雨对土壤酸性磷酸酶活性的影响及机理[J]. *中国环境科学*, 2003, 23(2): 176–179.
- [13] 吴杰民, 傅柳松. 酸雨长期淋溶对土壤酶活的影响[J]. *农业环境科学学报*, 1993, 12(3): 108–113, 119.
- [14] 朱雪竹, 黄耀, 杨新中. 模拟酸雨对不同土壤有机碳和作物秸秆分解的影响[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(2): 480–484.
- [15] 吴建平, 梁国华, 熊鑫, 等. 鼎湖山季风常绿阔叶林土壤微生物量碳和有机碳对模拟酸雨的响应[J]. *生态学报*, 2015, 35(20): 6686–6693.

- [16] 刘艳,马茂华,吴胜军,等.干湿交替下土壤团聚体稳定性研究进展与展望[J].土壤,2018,50(5):853-865.
- [17] 许中坚,刘广深,喻佳栋,等.模拟酸雨对红壤结构体及其胶结物影响的实验研究[J].水土保持学报,2002,16(3):9-11.
- [18] 程永毅,李忠意,白颖艳,等.电渗析法研究紫色土、黄壤和砖红壤的酸化特征[J].中国农业科学,2018,51(7):1325-1333.
- [19] 林琳,章家恩,徐华勤,等.模拟酸雨淋溶对赤红壤团聚体稳定性的影响[J].土壤通报,2013,44(4):799-806.
- [20] 刘滔,尹光彩,刘菊秀,等.酸沉降对南亚热带森林土壤主要元素的影响[J].应用与环境生物学报,2013,19(2):255-261.
- [21] 刘广深,许中坚,徐冬梅.酸沉降对土壤团聚体及土壤可蚀性的影响[J].水土保持通报,2001,21(4):70-74.
- [22] 王丽,李军,李娟,等.轮耕与施肥对渭北旱作玉米田土壤团聚体和有机碳含量的影响[J].应用生态学报,2014,25(3):759-768.
- [23] 赵世伟,苏静,吴金水,等.子午岭植被恢复过程中土壤团聚体有机碳含量的变化[J].水土保持学报,2006,20(3):114-117.
- [24] 陈升龙,梁爱珍,张晓平,等.土壤团聚体结构与有机碳的关系、定量研究方法展望[J].土壤与作物,2015,4(1):34-41.
- [25] Conant R T, Six J, Paustian K. Land use effects on soil carbon fractions in the southeastern United States. I. Management-intensive versus extensive grazing[J]. Biology and Fertility of Soils, 2003, 38(6): 386-392.
- [26] Nath A J, Lal R. Effects of tillage practices and land use management on soil aggregates and soil organic carbon in the north Appalachian region, USA[J]. Pedosphere, 2017, 27(1): 172-176.
- [27] Goh K M. Carbon sequestration and stabilization in soils: Implications for soil productivity and climate change[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2004, 50(4): 467-476.
- [28] 张晗, 欧阳真程, 赵小敏, 等. 江西省不同农田利用方式对土壤碳、氮和碳氮比的影响[J]. 环境科学学报, 2018, 38(6): 2486-2497.
- [29] PENG Peiqin, ZHANG Wenju, TONG Chengli, QIU Shaojun, ZHANG Wenchao. Soil C, N and P contents and their relationships with soil physical properties in wetlands of Dongting Lake floodplain[J]. 应用生态学报, 2005, 16(10): 1872-1878.
- [30] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327(5968): 1008-1010.
- [31] 吴建平, 陈小梅, 褚国伟, 等. 南亚热带森林土壤有机碳组分对模拟酸雨的早期响应[J]. 广西植物, 2015, 35(1): 61-68.
- [32] 张新明, 张俊平, 刘素萍, 等. 模拟酸雨对荔枝园土壤氮素迁移和土壤酸化的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(6): 18-21.
- [33] Harrington R A, Fownes J H, Vitousek P M. Production and resource use efficiencies in N- and P-limited tropical forests: a comparison of responses to long-term fertilization[J]. Ecosystems, 2001, 4(7): 646-657.
- [34] 梁国华, 张德强, 卢雨宏, 等. 鼎湖山季风常绿阔叶林土壤 C:N:P 生态化学计量特征对长期模拟酸雨的响应[J]. 生态环境学报, 2018, 27(5): 844-851.
- [35] 王文娟, 杨知建, 徐华勤, 等. 模拟酸雨对黑麦草草茬还田后水稻土壤质量的影响[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(19): 66-69.
- [36] 麦博儒, 郑有飞, 吴荣军, 等. 模拟硫酸型、硝酸型及其混合型酸雨对油菜生理特性、生长和产量的影响[J]. 植物生态学报, 2010, 34(4): 427-437.
- [37] 王善千. 青冈对酸雨的高光谱响应和荧光参数特征研究[D]. 南京: 南京大学, 2018.
- [38] 张新民, 柴发合, 王淑兰, 等. 中国酸雨研究现状[J]. 环境科学研究, 2010, 23(5): 527-532.