

· 专论与综述 ·

生物炭在土壤中的老化及其吸附重金属的研究进展

刘蕊^{1,2}, 罗璇^{1,2}, 李松^{1,2,3}, 张辉^{1,2}, 刘兴^{1,2}

(1. 贵州师范学院地理与资源学院, 贵州 贵阳 550018; 2. 贵州省流域地理国情监测重点实验室, 贵州 贵阳 550018; 3. 贵州师范学院资源环境与灾害研究所, 贵州 贵阳 550018)

摘要:综述了生物炭在土壤中的老化机制及主要影响因素方面的研究进展,指出生物炭的理化性质和结构表征在土壤中发生变化是其老化机制,生物炭的特性、土壤特性和环境条件等因素共同影响着生物炭的老化。总结了老化生物炭在土壤中对重金属吸附的影响,生物炭在老化过程中理化性质和结构表征的变化影响了生物炭-土壤体系对重金属的吸附,并且吸附能力因老化方式和重金属不同而存在差异。提出了开展多种重金属共存条件下老化生物炭的吸附效果和机理研究、针对生物炭田间实际老化过程对土壤重金属的吸附行为开展季节性和多年长期观测研究,以及对生物炭修复的重金属污染土壤在生物炭老化过程中可能造成的环境和健康风险开展综合、长期的跟踪研究与评估等展望。

关键词:生物炭;老化;重金属;吸附;土壤

中图分类号:X131.3;X53

文献标志码:A

文章编号:1006-2009(2020)05-0001-05

Biochar Aging in Soils and Its Influence on Adsorption of Heavy Metals: A Review

LIU Rui^{1,2}, LUO Xuan^{1,2}, LI Song^{1,2,3}, ZHANG Hui^{1,2}, LIU Xing^{1,2}

(1. School of Geography and Resources, Guizhou Education University, Guiyang, Guizhou 550018, China; 2. Guizhou Provincial Key Laboratory of Geographic State Monitoring of Watershed, Guiyang, Guizhou 550018, China; 3. Institute of Resources, Environment and Disaster, Guizhou Education University, Guiyang, Guizhou 550018, China)

Abstract: In this paper, the aging mechanisms of biochar in soils and its main influential factors were reviewed. It pointed out the change of physicochemical properties and structure characterization in soils were the mechanism of biochar aging. The characteristics of biochar and soil, and the environmental conditions had a combined effect on biochar aging. It summarized the influence of biochar aging on heavy metals adsorption in soils. The change of physicochemical properties and structural characterization in the aging process affected biochar-soil system on heavy metals adsorption, and the adsorbability was different with various aging modes and heavy metals. It suggested on carrying out studies on adsorption effect and mechanism of biochar aging in coexistence of various heavy metals, seasonal and long term observation of biochar's heavy metals adsorption behavior in field aging process, as well as comprehensive and long term tracking and assessment of possible environment and health risks of biochar aging in the remediation of heavy metals contaminated soils.

Key words: Biochar; Aging; Heavy metals; Adsorption; Soils

生物炭是在无氧或低氧条件下,将生物质热解炭化后得到的一种富碳多孔固体^[1],主要由C、H、O元素构成,其中C含量较高,且主要存在于芳环骨架中使其具有高度芳香化结构^[2]。生物炭的高

收稿日期:2019-10-13;修订日期:2020-07-23

基金项目:贵州省教育厅自然科学研究基金资助项目(黔教合KY字〔2015〕432号);贵州省科技厅科技支撑计划基金资助项目(黔科合支撑〔2019〕2289号,黔科合支撑〔2018〕2776号);贵州省科技厅基础研究计划基金资助项目(黔科合基础〔2016〕1112号)

作者简介:刘蕊(1984—),女,天津人,副教授,博士,主要从事污染控制原理与生态修复研究。

度芳香化结构是其保持生物和化学稳定性的主要因素。生物炭在土壤中可留存百年以上,巴西黑土中的生物炭已封存于土壤中近千年^[3]。利用同位素技术研究发现,欧洲黑钙土中的生物炭可留存5 000余年^[4]。人工形成的生物炭留存时间虽然比天然形成的生物炭短,但在土壤中也可以封存百年,远超过一般有机碳的留存时间^[5]。此外,生物炭不仅含C量高,而且具有比表面积大、孔隙度高、表面官能团丰富的特性,是一种呈碱性且吸附能力极强的多功能材料。作为一种环境友好的新型土壤改良剂,生物炭在修复污染土壤过程中表现出的潜力已经受到广泛关注^[6-7]。虽然生物炭本身呈现出极强的稳定性,但作为土壤改良剂,其性质和结构会随土壤环境或地质变迁而发生老化,这种老化作用可能会影响其吸持污染物的能力。因此,生物炭输入土壤环境后发生的老化机制及其生态和环境效应备受关注。今针对已开展的生物炭在土壤中的老化及其与土壤相互作用的机制研究进行归纳和分析,总结老化作用对生物炭吸附土壤重金属的影响,最终为应用生物炭修复重金属污染土壤的时效提供依据。

1 老化生物炭的理化性质和结构表征及其在土壤中的老化机制

1.1 老化生物炭的理化性质和结构表征

生物炭暴露于自然界中并非一成不变,在应用于土壤修复的过程中,会根据土壤环境差异改变原有的理化性质和结构表征。已有研究发现^[8-10],经自然老化的生物炭的孔分布和大小会发生变化,C含量减少,表面含氧官能团增多。生物炭在自然条件下老化较慢,不利于研究其性质变化。作为自然老化的替代方法,利用人工方法进行生物炭老化是目前研究老化生物炭的主要途径。依据模拟老化环境的不同,对生物炭老化的处理方法通常包括物理老化、化学老化和微生物老化。物理老化是通过调节生物炭所处环境的温度、湿度、光照等条件对生物炭进行培养的处理方法,常见的有冻-融循环、高温老化、干-湿交替、避光老化^[11];化学老化是利用化学试剂等使生物炭发生氧化还原反应的处理方法,常用试剂有氧气、浓硝酸、臭氧、过氧化氢等^[12],该方法处理时间短、变化明显^[13];微生物老化是将生物炭与微生物培养液共同培养的处理方法,虽然安全可靠,但微生物生存条件难以控制,

实际操作条件易受外界干扰,因而方法研究还处于探索阶段。

无论是自然老化还是人工老化,与新鲜生物炭相比,老化生物炭的理化性质和结构表征通常会发生如下变化:①表面元素组成和表面特征因老化方法不同,其变化有差异。Cheng等^[14]通过研究指出,改变生物炭老化时间和老化温度,会增加生物炭含O量,减少含C量。林庆毅等^[15]采用水洗的物理方法和酸化的化学方法分别对生物炭老化,结果表明,水洗老化生物炭表面O/C和(O+N)/C减少且表面较平整,而酸化老化生物炭的O/C和(O+N)/C增加,表面变得粗糙且孔结构受到严重破坏。②表面含氧官能团增多,其他官能团减少,酸性增强^[16-17]。

1.2 生物炭在土壤中的老化机制

生物炭在制备过程中会发生裂解,该作用不仅有利于在生物炭内部形成空隙丰富的微观结构,还可以产生高度共轭的芳香族类物质、脂肪族结构和无机灰分等^[18]。上述独特理化性质使生物炭输入土壤后会受到多种生物和非生物影响而发生一系列物理化学变化,最终造成生物炭在土壤环境中的老化:①生物炭中芳香结构程度会影响生物炭的稳定性;②易降解脂肪族结构使生物炭易于在土壤环境中老化;③生物炭表面与土壤矿物质或有机质通过化学键、静电力等相互作用力结合。

生物炭的稳定性和自然环境限制了其在环境中的矿化程度。生物炭在土壤中的老化机制复杂,具体表现在以下3个方面:①表面元素组成和孔隙结构的变化。生物炭一方面可能在土壤生物直接降解、共代谢等作用下部分矿化,改变C含量;另一方面,可能在土壤非生物作用下被氧化,增加含O量^[19]。另外,在田间干-湿交替情况下,土壤和生物炭中独立的孔隙可能将被连通,土壤孔隙水中细小的悬浮物与溶解性有机物会进入生物炭孔隙,生物炭的原吸附位点可能被占据,表面电荷可能被改变,并堵塞孔隙,进而改变生物炭的吸附性能^[20]。②表面官能团的变化。生物炭表面在非氧化条件下形成含氧官能团,引起阳离子交换量(CEC)、pH值、零电荷点(pH_{pzc})等发生变化,且这种变化与生物炭本身的性质关系密切^[21-22]。③盐基离子的释放及氧化层的形成。生物炭可能在降雨或灌溉条件下,利用溶解或离子交换等方式造成盐基离子的淋失。此外,老化的生物炭可能在表面

形成氧化层,该层可能因时间增加而变厚,最终发挥空间阻隔和化学保护作用。

2 生物炭在土壤中老化的影响因素

关于生物炭在土壤环境中的老化机制目前已有一定认识。生物炭的老化与其稳定性和矿化速率关系密切,影响生物炭在土壤中老化的主要决定因素包括生物炭的特性、土壤特性和环境条件。

2.1 生物炭的特性

热解温度是影响生物炭稳定性的重要因素之一。众多研究表明,热解温度上升有助于增加生物炭的芳香度,从而提高其稳定性。当热解温度低于 600 °C 时,生物炭具有高度稳定性的主要原因为无定形和乱层微晶结构^[23];当热解温度高于 600 °C 时,有序的石墨层结构开始增加。Cohen-Ofri 等^[24]指出,石墨层结构在微弱的范德华力作用下能够聚集在一起形成圆形结构,该结构可能比生物炭的无定形结构更加稳定。Keiluweit 等^[25]指出,随着炭化温度升高,生物炭固定 C 含量的增加会促进稳定组分与不稳定组分比值的升高。Bruun 等^[26]通过开展不同热解温度条件下小麦秸秆制备的生物炭实验,发现随着热解温度上升,纤维素与半纤维素含量逐渐减少,生物炭的矿化率减慢。以上研究从不同角度说明,提高热解温度有助于增加生物炭的芳香化程度,从而提升其在土壤中的稳定性。

2.2 土壤特性

气、液、固三相组成了土壤的复杂体系。生物炭在土壤中的老化除了与其表面性质、内部孔隙结构及化学组成关系密切之外,土壤特性也是决定性因素^[27]。

土壤质地可能通过比表面积差异影响生物炭的降解速率^[28]。土壤质地会影响土壤孔隙度和孔隙分布。土壤空气主要存在于砂质土壤的大孔隙中,不仅对土壤圈层与大气圈层的气体交换有强烈影响,还间接影响微生物的呼吸作用。因此,土壤质地可以通过影响土壤气体交换,改变生物炭的非生物氧化速率与生物氧化速率。

水分条件对土壤中生物炭组分的溶解过程、微生物转化活动及氧化还原作用极其重要。已有文献报道,干-湿交替能够显著影响土壤有机质降解、营养物质可利用性及微生物活性。章明奎等^[29]研究发现,土壤生物炭在淹水情况下比在未淹水情况下稳定性更高。Nguyen 等^[30]考察了 3 种

水分管理方式(淹水、不淹水和两者交替作用)对生物炭降解特性的影响,结果表明,玉米芯生物炭在不淹水条件下矿化率最大,橡木生物炭在干-湿交替条件下矿化率相对较大,且生物炭矿化率与土壤中氧气的可利用性有关,适宜的土壤水分管理方式将会减缓土壤生物炭的老化过程。

2.3 环境条件

环境条件对生物炭老化过程的影响主要包括以下两个方面:一方面,温度上升可能会加速生物炭的矿化过程;另一方面,光照可以通过光化学氧化作用加速生物炭的降解。

温度上升可以增加生物炭生物氧化与非生物氧化的速率,从而加速其矿化。Brodowski^[31]通过短期室内培养实验发现,生物炭的降解可以通过生物氧化的形式发生,且可利用 C 源输入促进生物炭降解。因此,生物炭生物氧化速率的改变可以通过温度影响土壤微生物活性。在非生物氧化方面,生物炭可以通过 O 的化学吸附促进羟基官能团的形成,该反应会在温度上升时迅速加快^[32]。因此,生物炭的非生物氧化速率会随温度上升而增加。

光化学氧化是生物炭非生物氧化的一种重要机制,其对有机质降解转化的促进作用已经得到普遍认可。然而,光化学对土壤生物炭的氧化作用及其机制研究目前还处于探索阶段。生物炭制备过程可能保留了制备原料中的苯酚类物质,该类物质极易受光化学反应影响,生物炭的降解速率可能因光照增强而加快。Chen 等^[33]根据苯酚的降解速率预测 550 °C 制备的生物炭,发现当停留时间为 10 min 时,苯酚被降解了 4.2%。因此,生物炭中的苯酚类物质会通过光化学反应发生降解,影响土壤生物炭的老化进程。

3 生物炭老化过程对土壤重金属吸附的影响

生物炭施入土壤后,逐渐发生复杂的老化作用,如氧化、表面覆盖、溶解及孔隙结构被破坏等,造成生物炭的理化性质(表面 C、O 元素,表面酸性,CEC)和结构表征(官能团组成、孔隙构成、比表面积)变化,从而改变了生物炭-土壤体系对重金属的吸附能力^[34-37]。Nagodavithane 等^[38]研究发现,对比输入新鲜生物炭和未输入生物炭的土壤,输入老化生物炭增加了土壤对 Cd 的吸附能力,而生物炭的某些性质尤其是电荷特性会随着老化而降低。Guo 等^[39]研究了老化作用对生物炭吸

附 Cu 的影响机理,结果表明,对比新鲜生物炭,老化生物炭的 CEC 和对 Cu 的吸附能力均下降;生物炭老化后,除羧基略降低外,表面其他含氧官能团增加,含氧官能团的解离特性可能是抑制老化生物炭吸附 Cu 能力的因素。陈昱等^[40]研究表明,生物炭老化后局部发生破碎,表面官能团发生变化,提高了对 Cd 的吸附效果。此外,不同的老化方式对重金属吸附能力的影响不尽相同。陈昱等^[41]研究表明,高温老化生物炭比新鲜生物炭对 Cd 的吸附量增加了 83.17%,是冻-融老化方式的 2.55 倍,是自然老化生物炭的 5.1 倍。Xu 等^[42]通过研究前期老化处理 (pre-aging) 和后期老化处理 (post-aging) 生物炭对土壤 Cd 的吸附,发现前期老化处理会抑制生物炭对 Cd 的吸附,而后期老化处理则有利于 Cd 的吸附。

4 展望

大量研究已经表明,生物炭在土壤中发生老化是普遍存在的现象。老化生物炭在土壤中对重金属吸附的影响与生物炭的理化特性和结构表征、土壤类型、重金属种类关系密切,产生的影响既可能是正面的也可能是负面的。尽管生物炭在土壤中的老化机制及其对重金属的吸附研究已取得多方面进展,但今后仍须重点开展以下研究:

(1) 大部分老化生物炭对土壤重金属的吸附研究是针对某种单一重金属,须开展多种重金属共存条件下老化生物炭的吸附效果和机理研究。

(2) 生物炭老化的影响研究多集中于室内土壤培养模拟实验及短期田间实验,须针对生物炭田间实际老化过程对土壤重金属的吸附行为开展季节性、多年长期观测研究。

(3) 须对生物炭修复的重金属污染土壤在生物炭老化过程中可能造成的环境和健康风险开展综合、长期的跟踪研究与评估。

[参考文献]

- [1] AL-WABEL M I, AL-OMRAN A, EI-NAGGAR A H, et al. Pyrolysis temperature induced changes in characteristics and chemical compositions of biochar produced from conocarpus wastes [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 131(3): 374 - 379.
- [2] 张旭东, 梁超, 诸葛玉平, 等. 黑碳在土壤有机碳生物地球化学循环中的作用 [J]. *土壤通报*, 2003, 34(4): 349 - 355.
- [3] GLASER B, BALASHOV E, HAUMAIER L, et al. Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region [J]. *Organic Geochemistry*, 2000, 31(7/8): 669 - 678.
- [4] SCHMIDT M W I, SKJEMSTAD J, CZIMCZIK C. Comparative analysis of black carbon in soils [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, 15(1): 163 - 167.
- [5] WOOLF D, AMONETTE J E, STREET-PERROTT F A, et al. Sustainable biochar to mitigate global climate change [J]. *Nature Communications*, 2010(1): 56 - 64.
- [6] AHMAD M, RAJAPAKSHA A U, LIM J E, et al. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review [J]. *Chemosphere*, 2014, 99(3): 19 - 33.
- [7] 李亚娇, 温猛, 李家科, 等. 土壤污染修复技术研究进展 [J]. *环境监测管理与技术*, 2018, 30(5): 8 - 14.
- [8] LAWRIEKO M, LAIRD D A, JOHNSON R L, et al. Accelerated aging of biochars: Impact on anion exchange capacity [J]. *Carbon*, 2016, 103: 217 - 227.
- [9] TRIGO C, SPOKAS K A, HALL K E, et al. Metolachlor sorption and degradation in soil amended with fresh and aged biochars [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2016, 64(16): 3141 - 3149.
- [10] 吴文卫, 周丹丹. 生物炭老化及其对重金属吸附的影响机制 [J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(1): 7 - 13.
- [11] 苗微. 生物炭陈化对土壤养分和水稻生长的影响 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2014.
- [12] ASCOUGH P L, BIRD M I, FRANCIS S M, et al. Variability in oxidative degradation of charcoal: influence of production conditions and environmental exposure [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75(9): 2361 - 2378.
- [13] 鞠文亮, 荆岩德, 刘兴. 生物炭陈化的研究进展 [J]. *土壤通报*, 2016, 47(3): 751 - 757.
- [14] CHENG C H, LEHMANN J. Ageing of black carbon along a temperature gradient [J]. *Chemosphere*, 2009, 75(8): 1021 - 1027.
- [15] 林庆毅, 姜存仓, 张梦阳. 生物炭老化后理化性质及微观机构的表征 [J]. *环境化学*, 2017, 36(10): 2107 - 2114.
- [16] GHAFFA A, GHOSH S, LI F, et al. Effect of biochar aging on surface characteristics and adsorption behavior of dialkyl phthalates [J]. *Environmental Pollution*, 2015, 206: 502 - 509.
- [17] ANYIKA C, MAJID Z A, IBRAHIM Z, et al. The impact of biochars on sorption and biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil: a review [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(5): 3314 - 3341.
- [18] WANG J L, WANG S Z. Preparation, modification and environmental application of biochar: a review [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 227: 1002 - 1022.
- [19] BIAN R, JOSEPH S, SHI W, et al. Biochar DOM for plant promotion but not residual biochar for metal immobilization dependent on pyrolysis temperature [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 662: 571 - 580.
- [20] HE L Z, HUANG Z, LIR G X, et al. Remediation of heavy metal contaminated soils by biocar: mechanisms, potential risks and applications in China [J]. *Environmental Pollution*, 2019, 252: 846 - 855.

- [21] JOSEPH S D, CAMPSARBESTAIN M, LIN Y, et al. An investigation into the reactions of biochar in soil[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2010, 48(7): 501–515.
- [22] 林雪原, 荆延德, 巩晨, 等. 生物炭吸附重金属的研究进展[J]. *环境污染与防治*, 2014, 36(5): 83–87.
- [23] PARIS O, ZOLLFRANK C, ZICKLER G A. Decomposition and carbonisation of wood biopolymers—a microstructural study of softwood pyrolysis[J]. *Carbon*, 2005, 43(1): 53–66.
- [24] COHEN-OFRI I, POPOVITZ-BIRO R, WEIER S. Structural characterization of modern and fossilized charcoal produced in natural fires as determined by using electron energy loss spectroscopy[J]. *Chemistry*, 2007, 13(8): 2306–2310.
- [25] KEILUWEIT M, NICO P S, JONSON M G, et al. Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (biochar)[J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, 44(4): 1247–1253.
- [26] BRUUN E W, HAUGGARD-NIELSEN H, IBRAHIM N, et al. Influence of fast pyrolysis temperature on biochar labile fraction and short-term carbon loss in a loamy soil[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2011, 35(3): 1182–1189.
- [27] WANG J, XIONG Z, KUZYAKOV Y. Biochar stability in soil: meta-analysis of decomposition and priming effects[J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2015, 8(3): 512–523.
- [28] 吴伟祥, 孙雪, 董达, 等. 生物质炭土壤环境效应[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [29] 章明奎, 顾国平, 王阳. 生物质炭在土壤中的降解特征[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2012, 38(3): 329–335.
- [30] NGUYEN B T, LEHMANN J. Black carbon decomposition under varying water regimes[J]. *Organic Geochemistry*, 2009, 40(8): 846–853.
- [31] BRODOWSKI S B. Origin, function, and reactivity of black carbon in the arable soil environment[D]. Bayreuth: University of Bayreuth, 2004.
- [32] PURI B, SHARMA S. Studies in formation and properties of carbon-oxygen surface complexes. 2. Nature of surface complexes formed on progressive treatment with oxidising solutions[J]. *Journal of Indian Chemical Society*, 1968, 45: 1115–1119.
- [33] CHEN W Y, MATTERN D L, OKINEDO E, et al. Photochemical and acoustic interactions of biochar with CO₂ and H₂O: applications in power generation and CO₂ capture[J]. *AIChE Journal*, 2014, 60(3): 1054–1065.
- [34] 徐东昱, 周怀东, 高博. 生物炭吸附重金属污染物的研究进展[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2016, 14(1): 7–15.
- [35] LAHORI A H, GUO Z Y, ZHANG Z Q, et al. Use of biochar as an amendment for remediation of heavy metal-contaminated soils: prospect and challenges[J]. *Pedosphere*, 2017, 27(6): 991–1014.
- [36] 王重庆, 王晖, 江小燕, 等. 生物炭吸附重金属离子的研究进展[J]. *化工进展*, 2019, 38(1): 692–706.
- [37] WU P, ATU-UI K, SYED T, et al. A scientometric review of biochar research in the past 20 years (1998–2018)[J]. *Biochar*, 2019, 1(1): 23–43.
- [38] NAGODAVITHANE C L, SINGH B, FANG Y. Effect of ageing on surface change characteristics and adsorption behavior of cadmium and arsenate in two contrasting soil amended with biochar[J]. *Soil Research*, 2014, 52(2): 155–163.
- [39] GUO Y, TANG W, WU J, et al. Mechanism of Cu(II) adsorption inhibition on biochar by its aging process[J]. *Journal of Environmental Science*, 2014, 26(10): 2123–2130.
- [40] 陈昱, 梁媛, 郑章琪, 等. 老化作用对水稻秸秆生物炭吸附 Cd(II)能力的影响[J]. *环境化学*, 2016, 35(11): 2337–2343.
- [41] 陈昱, 梁媛, 郑章琪, 等. 浮萍生物炭的老化作用对其性质及对 Cd(II)吸附的影响[J]. *环境工程*, 2016, 34(10): 60–64.
- [42] XU Z B, XU X Y, TSANG D C W, et al. Contrasting impacts of pre-and post-application aging of biochar on the immobilization of Cd in contaminated soils[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 242: 1362–1370.

· 征订启事 ·

欢迎订阅 2021 年《环境监控与预警》杂志

《环境监控与预警》是经中华人民共和国新闻出版广电总局批准,由江苏省生态环境厅主管、江苏省环境监测中心主办、南京大学环境学院和江苏省环境监测协会共同协办的期刊。期刊面向全国公开发行,国内统一刊号 CN 32–1805/X,国际标准刊号 ISSN 1674–6732。

本刊致力于传播和推广先进的环保科技成果,聚焦环境前沿科技,介绍国内外环境监测、环境预警、环境信息等领域的新技术、新成果、新发展,跟踪国家及地方的环境政策、环境标准的变化。读者对象主要是从事环境管理、环境监测、环境监察、环境信息、环境治理、环境科学研究及其他领域的环境工作者。常设栏目有:前沿评述、环境预警、监测技术、解析评价、监管新论等。本刊为双月刊,大 16 开国际标准版,64 页,每逢单月 30 日出版。国内定价(含邮费)35 元/期,全年 210 元。

订阅方法:1. 邮局订阅:邮发代号:28–414。2. 自行订阅:汇款后将回执单 E-mail 至以下联系人(回执单下载地址: <http://www.hjkyyj.com>)。联系人:朱滢;联系电话:025–69586548;联系邮箱:hjkyyj@163.com。

汇款信息:单位名称:江苏省环境监测协会 开户行:中行凤凰花园城支行 账号:523558192511