

DOI: 10.11766/trxb201612080226

不同气候和土壤条件下秸秆腐解过程中 养分的释放特征及其影响因素*

李昌明^{1, 2} 王晓玥¹ 孙波^{1†}

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 农田土壤中秸秆腐解伴随氮磷钾养分的释放是重要的生物地球化学过程, 也是秸秆还田替代化肥养分的基础。了解不同农区秸秆分解过程中的养分释放动态, 揭示秸秆、气候和土壤条件的交互作用机制, 是制定秸秆还田合理措施的理论基础。基于寒温带-暖温带-中亚热带的黑土、潮土、红壤互置试验平台, 研究了小麦、玉米秸秆在3年腐解过程中养分释放过程和影响因素。结果表明, 秸秆中养分释放速率的大小顺序为K>P>N; 秸秆中氮素和磷素在寒温带以及在红壤和潮土中表现为先富集再释放特征, 在暖温带、中亚热带以及黑土中表现为直接释放特征; 秸秆中钾素均表现为直接快速释放特征, 在腐解0.5 a平均释放率达89.5%。气候和土壤条件主导了氮磷的释放, 其相对平均贡献率分别为19.5%和15.2%。在腐解后期(2~3 a)气候、土壤和秸秆因素对养分释放的贡献率<30%, 说明土壤生物因素可能起了主导作用。

关键词 秸秆; 腐解过程; 养分释放; 气候条件; 土壤类型

中图分类号 Q143; S154.36 **文献标识码** A

有机物料(植物残体、凋落物、有机肥等)腐解过程中释放养分是维持土壤肥力的重要途径^[1]。有机物料中养分释放主要表现为三种模式: 直接释放、富集-释放、淋溶-富集-释放^[2]。土壤中微生物分解和元素淋溶控制了有机物料的养分释放过程, 影响因素包括有机物料的组成^[3]、生物群落组成^[4]、土壤类型^[5]、气温和降水^[6]以及分解时间等。在对凋落物养分释放的研究中, 已揭示了不同凋落物种类和气候因子对养分释放的影响^[7], 分析了典型凋落物在不同地区不同土壤条件下的养分释放方式^[5], 但对凋落物种类、气候和土壤条件的交互作用机制仍不明确。

秸秆还田是提高土壤肥力、替代化学养分投入从而减施化肥的主要措施之一。我国秸秆资源丰富, 年秸秆总产量为 8.42×10^8 t, 其中玉米、小麦占总秸秆产量的2/3^[8]。我国农业主产区具有不同的气候和土壤类型, 必然影响了不同类型秸秆的腐解过程和养分释放机制。本研究基于我国东部水热梯度带的典型土壤互置平台, 研究玉米、小麦秸秆的腐解过程, 揭示不同气候和土壤条件下氮、磷、钾养分的释放特征, 定量分析秸秆类型、气候和土壤条件对养分释放的交互作用, 为提出不同农区的秸秆还田策略和养分资源综合管理措施提供理论基础。

* 国家重点研发计划(2016YFD0200309)、中国科学院战略性先导科技专项(XDB15030200)、中国科学院科技服务网络计划(KFJ-SW-STS-142)资助 Supported by National Key R&D Project of China (No. 2016YDFD0200300), Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (No. XDB15030200) and Science and Technology Service Network Initiative (No. KFJ-SW-STS-142)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: bsun@issas.ac.cn

作者简介: 李昌明(1987—), 男, 甘肃兰州人, 博士研究生, 主要从事土壤生态环境研究。E-mail: churmi@163.com

收稿日期: 2016-12-08; 收到修改稿: 2017-03-24; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2017-05-04

1 材料与方

1.1 秸秆腐解试验样地设置

2005年, 选择位于寒温带、暖温带和中亚热带的3个农业生态试验站: 海伦(HL), 封丘(FQ)和鹰潭(YT), 将3个气候带的典型土壤(黑土、潮土、红壤)相互置换建立我国东部水热梯度的土壤互置试验平台^[9]。黑土、潮土和红壤分别属于黏化湿润均腐土、淡色潮润锥形土和黏化湿润富铁

土。2008年在土壤互置试验平台上布置秸秆腐解试验, 将玉米、小麦秸秆剪为5 cm长度(其中玉米秸秆进一步剪为细条), 定量称取100 g后装入2层200目尼龙网袋内(10 cm宽×15 cm长), 于2008年5月在3个地点垂直埋入空白处理小区的表层土壤中, 埋入深度为10~20 cm。采用尼龙网袋单独放置秸秆研究腐解过程的目的是区分秸秆腐解微生物和土壤微生物群落结构之间的差异^[9], 同时避免混合土壤影响对秸秆残留量的测定^[10]。试验区气候条件及土壤和秸秆属性见表1。

表1 试验区气候和土壤条件以及采用的秸秆性质

Table 1 Climate and soil conditions at the experiment sites and properties of the straw tested

地点和气候类型 Location and climate type	年均温 Annual mean temperature (°C)	相对湿度 Relative humidity (%)	年均降雨量 Annual mean precipitation (mm)
寒温带海伦 Cold temperate, Hailun (HL)	1.5	59.8	530
暖温带封丘 Warm temperate, Fengqiu (FQ)	13.9	70.0	605
中亚热带鹰潭 Middle subtropics, Yingtan (YT)	17.8	70.1	1 795
土壤类型 Soil type	土壤pH Soil pH	土壤有机质 Soil organic matter (g kg ⁻¹)	土壤全氮 Soil total N (g kg ⁻¹)
黑土Phaeozem	6.06	53.0	2.47
潮土Cambisol	8.23	8.35	0.66
红壤Acrisol	4.98	8.28	0.79
秸秆类型 Straw type	秸秆总碳 Straw total C (mg g ⁻¹)	秸秆总氮 Straw total N (mg g ⁻¹)	秸秆碳氮比 Straw C/N
玉米秸秆Maize straw	446	6.24	71.5
小麦秸秆Wheat straw	431	7.47	57.7

1.2 秸秆、土壤样品采集和养分测定

在腐解试验进行至0.5、1、2和3年时, 分别取出3个重复的尼龙网袋, 装入塑料袋称取总重, 于保温盒低温运回实验室在-20 °C冰箱保存。取部分残留秸秆样品在70 °C烘干, 测定含水量和氮、磷、钾含量, 分别采用半微量凯氏定氮法、钼锑钒比色法和HF-HClO₄消煮-火焰光度计法测定氮、磷和钾含量^[11]。在上述采样时间, 采集空白处理小区的表层土壤(0~20 cm)样品, 分析土壤有机质、全氮、全磷、全钾。土壤有机质采用重铬酸钾容量法, 土壤全氮采用半微量凯氏定氮法, 土壤全

磷采用磷钼蓝分光光度法, 土壤全钾采用NaOH熔融-火焰光度计法^[11]测定。

1.3 数据分析

根据不同腐解时间的秸秆残留量和养分含量计算各腐解阶段的养分残留量(Rt)、养分残留率(Ft)、养分释放量(Dt)、养分释放率(Yt)和养分释放速率常数(k):

$$Rt = Ct \times Mt \quad (1)$$

$$Ft = Ct \times Mt / (C_0 \times M_0) \quad (2)$$

$$Dt = C_0 \times M_0 - Ct \times Mt \quad (3)$$

$$Yt = Dt / (C_0 \times M_0) \quad (4)$$

$$R_t = b \times e^{-kt} \quad (5)$$

式中, R_t 为残留秸秆养分总量 (mg); F_t 为残留秸秆养分总量占初始秸秆养分总量的百分比 (%); C_0 为初始秸秆的养分含量 (mg g^{-1}); D_t 为秸秆腐解 t 年过程中的养分 (N、P、K) 释放总量 (mg); Y_t 为秸秆腐解 t 年过程中的养分 (N、P、K) 释放量占初始秸秆养分总量的百分比 (%); C_t 为腐解 t 年后残留秸秆中的养分含量 (mg g^{-1}); M_0 为初始秸秆的重量 (g); M_t 为腐解 t 年后残留秸秆的重量 (g); t 为腐解时间 (a); b 为衰减方程常数; e 为自然对数; k 为养分释放速率常数。

利用SPSS (version 19.0) 进行多因素方差分析 (Multivariable-ANOVA), 计算秸秆、气候、土壤因子影响氮、磷、钾释放量的显著性水平, 基于第三类平方和 (Type III sum of square) 计算各影响因素对释放量变异的贡献率^[4]。利用多元逐步

回归 (Stepwise regression) 建立氮、磷、钾释放速率与气候、土壤及秸秆属性间的回归方程。气候因子包括年均温、相对湿度、年均降雨量, 土壤因子包括pH、有机质和全氮, 秸秆因子包括全碳、全氮和C/N。

2 结果

2.1 秸秆氮、磷、钾素释放特征

图1表明, 在黑土中, 玉米和小麦秸秆氮素在不同气候带中大多表现为直接释放过程。在潮土和红壤中, 小麦秸秆氮素在3个气候带大多表现为先富集后释放过程; 玉米秸秆氮素在寒温带表现为富集过程, 在暖温带和中亚热带大多为直接释放过程, 仅在中亚热带红壤中表现为淋溶-富集-释放过程。腐解第3年, 在暖温带和中亚热带,

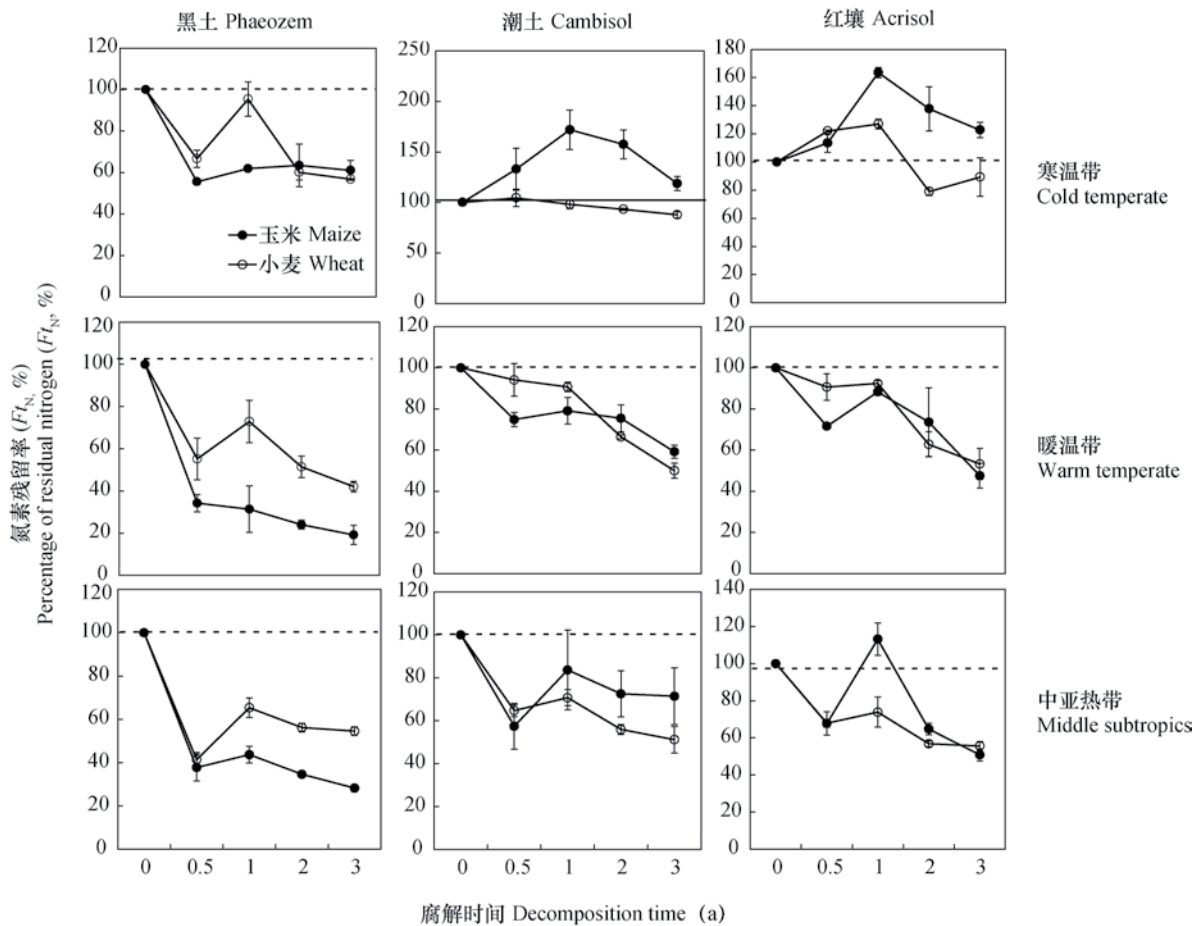


图1 不同气候和土壤条件下小麦和玉米秸秆氮素残留率 (F_{tN} , %) 随腐解时间的变化 (图中数据为平均值, 误差线为标准误差)

Fig. 1 Variation of N residual rate (F_{tN} , percentage of total nitrogen in wheat straw or maize stalk residue to that in the straw applied) with decomposition going on relative to soil and climate (All the data in the figure are mean plus standard error)

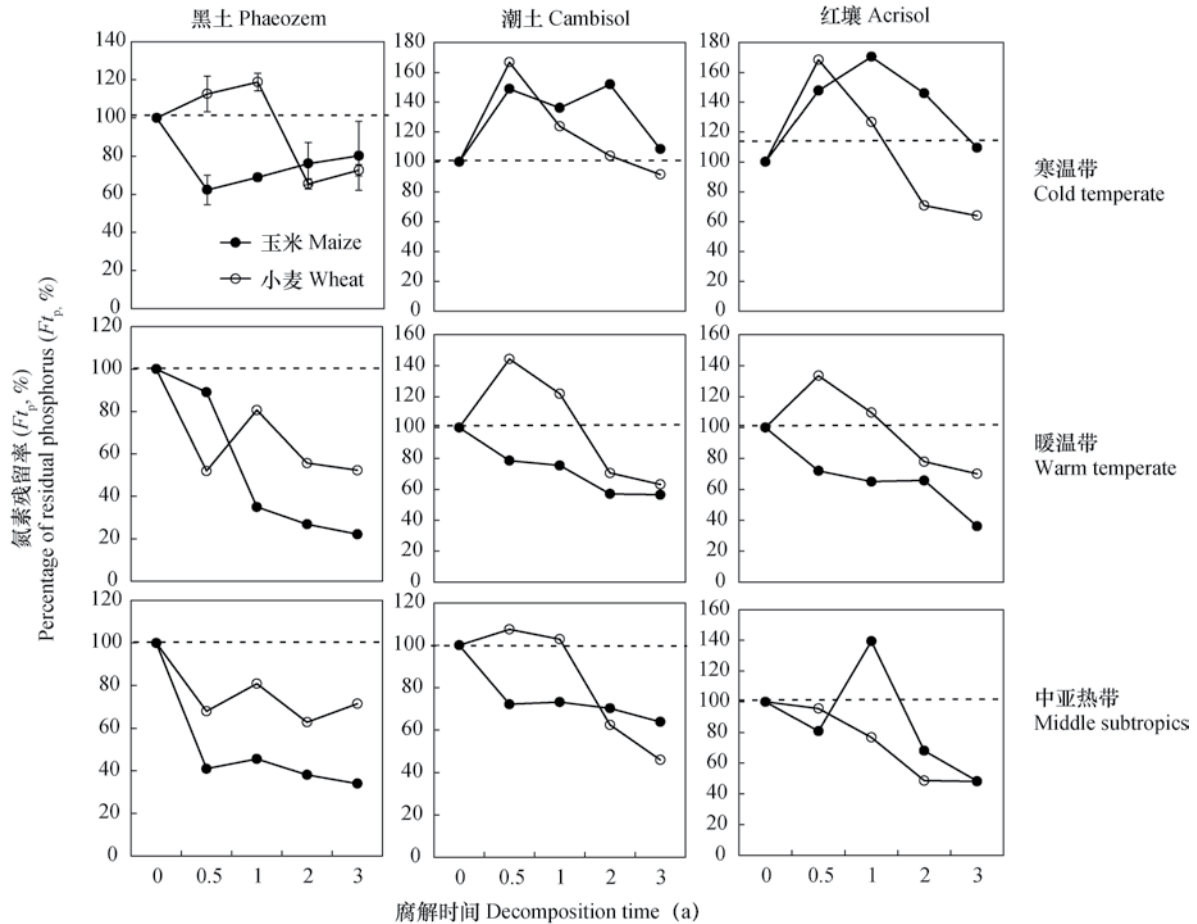


图2 不同气候和土壤条件下小麦和玉米秸秆磷素释放百分比 (F_{tP}) 随腐解时间的变化 (图中数据为平均值, 误差线为标准误)

Fig. 2 Variation of P residual rate (F_{tP} , percentage of total phosphorus in wheat straw or maize stalk residue to that in the straw applied) with decomposition going on relative to soil and climate (All the data in the figure are mean plus standard error)

玉米秸秆氮素在三种土壤中的平均累积净释放率为 $53.9\% \pm 12.1\%$ 、小麦秸秆为 $48.9\% \pm 8.5\%$ 。在寒温带, 小麦秸秆在三种土壤中的平均释放率为 $22.1\% \pm 10.6\%$; 玉米秸秆在潮土、红壤中的平均富集率为 $20.7\% \pm 2.8\%$, 在黑土中的释放率为 $39.0\% \pm 0.7\%$ 。

图2表明, 在黑土中, 玉米、小麦秸秆磷素在不同气候带中大多表现为直接释放过程, 只有小麦秸秆在寒温带表现出先富集后释过程。在潮土和红壤中, 小麦秸秆磷素在不同气候带中大多表现出先富集后释过程; 玉米秸秆磷素在寒温带也表现为富集过程, 但在暖温带和中亚热带大多表现为直接释放过程; 玉米秸秆磷素在中亚热带的红壤中出现淋溶-富集-释过程。三年腐解期间, 在暖温带和中亚热带, 玉米秸秆磷素在三种土壤中的平均累积净释放率为 $56.5\% \pm 11.5\%$ 、小麦秸秆为

$41.5\% \pm 8.4\%$ 。在寒温带, 小麦秸秆磷素在三种土壤中的平均释放率为 $24.0\% \pm 8.1\%$; 玉米秸秆磷素在潮土和红壤中的平均富集率为 $9.03\% \pm 0.59\%$, 在黑土中的释放率为 $19.9\% \pm 0.8\%$ 。

小麦和玉米秸秆的钾素在不同气候和土壤中均表现为快速直接释过程, 在腐解初期的0.5 a, 其平均释放率已达 $89.5\% \pm 1.1\%$ 。在腐解第3年, 玉米和小麦秸秆钾素的平均净释放率分别为 $96.5\% \pm 13.7\%$ 和 $96.2\% \pm 13.6\%$ 。总体上, 小麦和玉米秸秆中氮素和磷素释过程较为相似, 在不同气候和土壤中表现出富集、富集-释和直接释3种类型, 而秸秆钾素均为直接释过程, 而且秸秆钾的平均释速率大于氮素和磷素。

2.2 秸秆氮、磷、钾的释速率常数

利用衰减指数方程拟合了秸秆养分残留量 (R_t) 与腐解时间 (t) 的关系, 拟合结果 (表2)

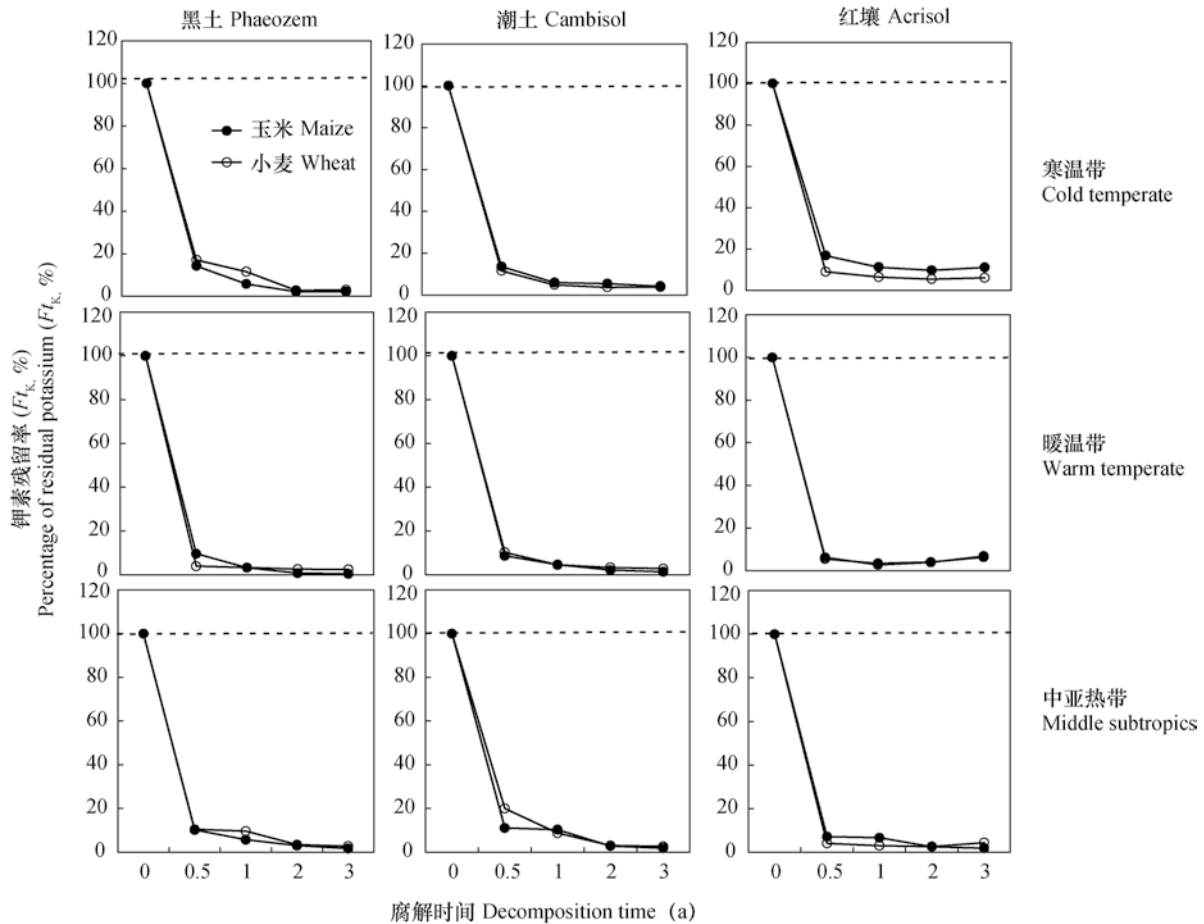


图3 不同气候和土壤条件下小麦和玉米秸秆钾素释放百分比 (Ft_k) 随腐解时间的变化 (图中数据为平均值, 误差线为标准误)

Fig. 3 Variation of K residual rate (Ft_k , percentage of total potassium in wheat straw or maize stalk residue to that in the straw applied) with decomposition going on relative to soil and climate (All the data in the figure are mean plus standard error)

表明: 不同气候和土壤中秸秆氮素和磷素的释放率大多不能用衰减指数方程进行拟合, 平均方程拟合优度 (r^2) 分别为 0.616 ± 0.060 和 0.543 ± 0.069 。在不同气候和土壤中, 秸秆钾素释放率拟合均达显著水平, 其平均方程拟合优度 (R^2) 为 0.99。玉米和小麦秸秆钾素的平均释放速率常数 (k) 分别为 4.33 ± 0.23 和 4.65 ± 0.40 , 两种秸秆之间的差异不显著。在 3 个气候带中, 秸秆钾素的 k 值总体上表现为暖温带 (5.20 ± 0.30) > 中亚热带 (4.47 ± 0.44) > 寒温带 (3.79 ± 0.22); 在 3 种土壤中, k 值总体上表现为红壤 (5.03 ± 0.43) > 黑土 (4.40 ± 0.44) > 潮土 (4.03 ± 0.24)。

2.3 气候、土壤和秸秆条件对秸秆氮、磷、钾释放量和释放率的影响

表 3 表明, 在腐解前期 (0.5 a, 1 a) 气候和土壤显著影响了秸秆氮素释放量, 其贡献率分别

为 $26.3\% \pm 4.65\%$ 和 $26.3\% \pm 2.15\%$, 秸秆条件的影响不显著。在腐解后期 (2 a, 3 a), 气候条件成为秸秆氮素释放量的主导影响因素 (贡献率为 $12.7\% \pm 3.64\%$), 土壤条件的影响下降 (贡献率为 $7.01\% \pm 0.25\%$), 而秸秆条件也有较小但显著的影响 (贡献率为 $3.08\% \pm 1.67\%$)。总体上, 秸秆、气候和土壤对秸秆氮素释放量的交互作用影响较小, 在腐解后期 (2 a, 3 a) 平均贡献率为 $1.23\% \pm 0.28\%$ 。

同样地, 气候和土壤显著影响了秸秆磷素释放量, 但其影响随腐解时间而下降。其中气候条件的贡献率由腐解前期 (0.5 a, 1 a) 的 $26.9\% \pm 0.2\%$ 下降为后期 (2 a, 3 a) 的 $12.2\% \pm 1.7\%$, 土壤条件的贡献率由 $24.3\% \pm 0.2\%$ 下降为 $3.31\% \pm 1.43\%$ 。秸秆条件对秸秆磷素释放量的影响较小, 在腐解前期影响显著 (贡献率为 6.91%), 在腐解后期影响

表2 玉米和小麦秸秆氮、磷、钾素残留量的衰减指数拟合方程

Table 2 The exponential decay equation fitting attenuations of residual rates of N, P and K in maize stalk and wheat straw during the 3-year decomposition

养分 Nutrient	土壤类型 Soil type	地点 Location	玉米秸秆Maize straw			小麦秸秆Wheat straw		
			拟合方程 Equation	r^2	p	拟合方程 Equation	r^2	p
氮素 Nitrogen	黑土 Phaeozem	HL	$Rt=500.35 \times e^{-0.13t}$	0.30	0.34	$Rt=698.81 \times e^{-0.18t}$	0.56	0.14
		FQ	$Rt=575.58 \times e^{-1.13t}$	0.80	0.04	$Rt=654.38 \times e^{-0.27t}$	0.69	0.08
		YT	$Rt=519.72 \times e^{-0.56t}$	0.66	0.09	$Rt=576.07 \times e^{-0.16t}$	0.26	0.39
	潮土 Cambisol	HL	—	—	—	$Rt=770.77 \times e^{-0.05t}$	0.84	0.03
		FQ	$Rt=575.28 \times e^{-0.14t}$	0.74	0.06	$Rt=770.79 \times e^{-0.22t}$	0.95	0.01
		YT	$Rt=523.91 \times e^{-0.07t}$	0.15	0.52	$Rt=661.75 \times e^{-0.22t}$	0.75	0.06
	红壤 Acrisol	HL	—	—	—	$Rt=870.99 \times e^{-0.10t}$	0.33	0.31
		FQ	$Rt=594.97 \times e^{-0.19t}$	0.71	0.07	$Rt=767.96 \times e^{-0.21t}$	0.93	0.01
		YT	$Rt=618.19 \times e^{-0.19t}$	0.45	0.22	$Rt=668.43 \times e^{-0.20t}$	0.74	0.06
磷素 Phosphorus	黑土 Phaeozem	HL	$Rt=26.93 \times e^{-0.03t}$	0.03	0.79	$Rt=47.03 \times e^{-0.16t}$	0.55	0.15
		FQ	$Rt=34.67 \times e^{-0.68t}$	0.89	0.02	$Rt=35.31 \times e^{-0.19t}$	0.46	0.21
		YT	$Rt=27.43 \times e^{-0.45t}$	0.61	0.12	$Rt=36.15 \times e^{-0.11t}$	0.40	0.25
	潮土 Cambisol	HL	—	—	—	$Rt=54.92 \times e^{-0.10t}$	0.23	0.41
		FQ	$Rt=31.54 \times e^{-0.21t}$	0.89	0.02	$Rt=52.96 \times e^{-0.21t}$	0.54	0.16
		YT	$Rt=29.83 \times e^{-0.13t}$	0.63	0.11	$Rt=46.64 \times e^{-0.26t}$	0.82	0.03
	红壤 Acrisol	HL	$Rt=45.97 \times e^{-0.01t}$	0.01	0.91	$Rt=57.11 \times e^{-0.22t}$	0.45	0.22
		FQ	$Rt=34.23 \times e^{-0.28t}$	0.84	0.03	$Rt=49.64 \times e^{-0.17t}$	0.59	0.13
		YT	$Rt=37.11 \times e^{-0.20t}$	0.36	0.28	$Rt=42.62 \times e^{-0.30t}$	0.94	0.01
钾素 Potassium	黑土 Phaeozem	HL	$Rt=1203.05 \times e^{-3.75t}$	0.99	0.001	$Rt=1624.17 \times e^{-3.20t}$	0.99	0.01
		FQ	$Rt=1203.78 \times e^{-4.58t}$	0.99	0.001	$Rt=1629.29 \times e^{-6.33t}$	0.99	0.001
		YT	$Rt=1203.36 \times e^{-4.37t}$	0.99	0.001	$Rt=1627.27 \times e^{-4.15t}$	0.99	0.01
	潮土 Cambisol	HL	$Rt=1202.98 \times e^{-3.82t}$	0.99	0.004	$Rt=1628.50 \times e^{-4.17t}$	0.99	0.002
		FQ	$Rt=1203.66 \times e^{-4.74t}$	0.99	0.001	$Rt=1628.70 \times e^{-4.41t}$	0.99	0.002
		YT	$Rt=1202.16 \times e^{-4.01t}$	0.99	0.001	$Rt=1625.94 \times e^{-3.04t}$	0.99	0.001
	红壤 Acrisol	HL	$Rt=1200.05 \times e^{-3.22t}$	0.99	0.004	$Rt=1628.48 \times e^{-4.60t}$	0.99	0.001
		FQ	$Rt=1203.94 \times e^{-5.46t}$	0.99	0.004	$Rt=1629.20 \times e^{-5.66t}$	0.99	0.001
		YT	$Rt=1203.57 \times e^{-5.00t}$	0.99	0.002	$Rt=1629.29 \times e^{-6.26t}$	0.99	0.001

注：HL，寒温带海伦；FQ，暖温带封丘；YT，中亚热带鹰潭。采用衰减方程 $Rt=b \times e^{-kt}$ 拟合养分释放速率常数 k 值， r^2 为方程拟合优度， p 为显著性水平 Note: HL stands for Hailun in the cold temperate; FQ for Fengqiu in the warm temperate; and YT for Yingtan in the middle subtropics. Nutrient release rate constant (k) was fitted by the attenuation equation ($Y=b \times e^{-kt}$); r^2 denotes the goodness-of-fitting of the equation; and p significance level

表3 玉米和小麦秸秆三年腐解期间气候、土壤和秸秆条件影响养分释放量的多因素方差分析

Table 3 Multivariable ANOVA of effects of climate, soil and straw conditions on nutrient release amount during the 3-year maize stalk and wheat straw decomposition

养分 Nutrient	影响因素 Affecting factor	腐解时间Decomposition time							
		0.5 a		1 a		2 a		3 a	
		<i>p</i>	E (%)	<i>p</i>	E (%)	<i>p</i>	E (%)	<i>p</i>	E (%)
氮素 Nitrogen	秸秆Straw (St)	0.49	0.10	0.06	1.02	0.00	4.74	0.00	1.41
	气候Climate (Cl)	0.00	21.66	0.00	30.95	0.00	9.09	0.00	16.36
	土壤Soil (So)	0.00	24.13	0.00	28.43	0.00	6.76	0.00	7.25
	St × Cl	0.06	1.24	0.00	4.78	0.00	1.93	0.01	1.09
	St × So	0.50	0.28	0.00	10.16	0.00	2.07	0.00	1.74
	Cl × So	0.02	2.70	0.06	2.86	0.00	0.79	0.00	1.84
	St × Cl × So	0.21	1.25	0.01	4.08	0.83	0.06	0.58	0.28
磷素 Phosphorus	秸秆Straw (St)	0.00	9.79	0.00	4.03	0.00	3.00	0.13	0.38
	气候Climate (Cl)	0.00	26.72	0.00	27.08	0.00	10.45	0.00	13.89
	土壤Soil (So)	0.00	24.52	0.00	24.04	0.00	4.74	0.01	1.88
	St × Cl	0.71	0.48	0.00	7.65	0.00	3.47	0.00	3.34
	St × So	0.14	2.85	0.00	10.87	0.01	1.58	0.01	1.73
	Cl × So	0.49	2.40	0.22	2.52	0.02	0.96	0.11	1.30
	St × Cl × So	0.04	7.91	0.00	8.61	0.51	0.24	0.02	2.17
钾素 Potassium	秸秆Straw (St)	0.00	2.29	0.00	2.21	0.00	2.28	0.00	2.16
	气候Climate (Cl)	0.07	0.08	0.07	0.04	0.11	0.00	0.08	0.01
	土壤Soil (So)	0.11	0.05	0.06	0.00	0.06	0.00	0.11	0.03
	St × Cl	0.35	0.01	0.71	0.00	0.13	0.00	0.07	0.00
	St × So	0.05	0.03	0.06	0.02	0.15	0.00	0.28	0.00
	Cl × So	0.06	0.05	0.08	0.02	0.11	0.00	0.09	0.01
	St × Cl × So	0.12	0.04	0.10	0.01	0.34	0.00	0.08	0.00

注: *p*为显著性水平, E为影响因子对变异的解释量 Note: *p* denotes the significance level, and E contribution rate of the affecting factor

不显著。秸秆、气候和土壤对秸秆磷素释放率的交互作用影响也较小,在腐解后期(2 a, 3 a)平均贡献率为 $1.85\% \pm 0.39\%$ 。

在不同气候和土壤中,秸秆钾素释放量仅受到秸秆条件的显著影响,但其贡献率很小,仅为 $2.23\% \pm 0.07\%$,这可能与秸秆钾素的快速释放有关。

逐步回归分析结果显示(表4),秸秆氮素释放率受到秸秆碳氮比、土壤全氮、年均温的显著影响;磷素释放率受到相对湿度、土壤全氮、秸秆氮磷比的显著影响;而秸秆中钾素的释放率受到秸秆碳氮比、秸秆氮磷比和相对湿度的显著影响。说明气候、土壤和秸秆属性共同制约着秸秆氮素和磷素

的释放率,而秸秆属性和气候条件控制了秸秆钾素的释放率。

3 讨论

秸秆在土壤中腐解释放氮、磷、钾养分的过程一般表现为三种模式:淋溶-富集-释放、富集-释放、直接释放^[2, 12]。本文基于在3个气候带设置的3种典型土壤的置换试验平台,通过玉米和小麦秸秆的3年腐解试验发现,氮素释放随气候和土壤条件变化表现出淋溶-富集-释放、富集-释放和直接释放三种模式(图1),磷素释放表现出富集-释

表4 玉米和小麦秸秆氮、磷、钾素释放率与气候、土壤、秸秆因素间的逐步回归方程

Table 4 Stepwise regression equations of nutrient release rate of maize stalk and wheat straw with climate, soil and straw factors during the 3-year decomposition

养分 Nutrient	逐步回归方程 Stepwise regression equation	拟合优度 Goodness-of-fit R^2	显著性水平 p Significant level p
氮Nitrogen	$Y_{I_N} = -3.41 - 0.40C/N + 0.49TN + 0.43AT$	0.67	0.001
磷Phosphorus	$Y_{I_P} = -83.73 + 0.49RH + 0.42TN + 0.25N/P$	0.47	0.003
钾Potassium	$Y_{I_K} = 2574.39 - 0.87C/N - 0.33N/P - 0.30RH$	0.62	0.002

注： Y_{I_N} ，氮素释放率； Y_{I_P} ，磷素释放率； Y_{I_K} ，钾素释放率；AT，年均温；RH，相对湿度；C/N，秸秆碳氮比；TN，土壤全氮含量；N/P，秸秆氮磷比 Note: Y_{I_N} stands for N release rate; Y_{I_P} , for P release rate; Y_{I_K} for K release rate; AT for annual mean temperature; RH for relative humidity; C/N for carbon/nitrogen in straw; TN for soil total nitrogen; and N/P for nitrogen/phosphorus in straw

放和直接释放两种模式（图2），而钾素释放仅表现出直接快速释放模式（图3）。气候和土壤条件显著影响了氮素和磷素的释放，而秸秆属性显著影响了钾素的释放，这些因素的影响程度随腐解时间而变化。

3.1 气候条件对秸秆腐解过程中养分释放的影响

受到气候和土壤条件的影响，在玉米和小麦秸秆3年腐解期间，氮和磷素释放主要表现出先富集后释放和直接释放两种模式（图1，图2）；在中亚热带红壤玉米秸秆氮和磷素出现淋溶-富集-释放过程。秸秆氮素主要以蛋白质形式存在，在腐解前期大量矿化后以铵的形式释放到土壤中^[13]，因此出现腐解前期的短暂淋溶特征。在寒温带，潮土和红壤中的玉米秸秆氮素表现出富集过程，小麦秸秆氮素虽然表现出先富集后释放特征，但其释放量也较少；而在暖温带和中亚热带玉米和小麦秸秆氮素在富集3年均表现为净释放。寒温带（海伦）秸秆氮素释放量少甚至富集可能与低温少雨限制了微生物代谢活性有关^[7, 14]。在低温地区，特别是在氮磷养分缺乏的土壤中，秸秆腐解微生物群落需要先蓄积氮磷养分，满足低温下群落的繁殖，达到一定养分含量阈值后，腐解微生物群落才能分泌足够数量和活性的胞外酶启动对秸秆的大量分解并释放氮磷养分，因此在低温区的贫瘠土壤中秸秆氮磷释放表现为先富集后释放模式。对高山森林凋落物的腐解研究也发现，其分解过程中氮素和磷素均存在富集现象^[15]。但在气温较高的暖温带（封丘年均温13.9℃）和中亚热带（鹰潭年均温17.8℃），微生物活性较强^[16]，秸秆氮磷释放快；加之中亚热

带降雨较多，秸秆氮磷表现出直接释放或者淋溶-短暂腐解-释放模式。Agehara和Warncke^[17]研究也发现增加土壤温度和湿度显著提高了有机物料中氮素的释放速率，促进了养分的净释放。在本研究中，气候条件对秸秆氮素和磷素释放量的影响最大（平均贡献率均为19.5%），因此在制定不同区域的秸秆还田替代化肥措施时，首先需要考虑气候条件的适宜性。

3.2 土壤条件对秸秆腐解过程中养分释放的影响

土壤通气性、pH、氧化还原强度（Eh）以及养分状况均影响了秸秆腐解过程中养分的释放^[5, 18]。本研究结果表明，在相同气候带条件下，黑土中氮磷大多表现为直接释放模式，而潮土和红壤中大多表现为先富集后释放模式（图1，图2）。土壤中微生物群落可以进入秸秆表面形成代谢活性中心^[19]，秸秆周围的土壤可以为微生物提供养分^[5]，由于黑土中氮、磷含量远高于潮土和红壤，因此促进了秸秆的腐解和秸秆养分的释放。玉米秸秆氮磷在寒温带的潮土和红壤中表现为富集过程，这与低温下秸秆分解慢有关，而且潮土中丰富的钙离子和红壤中的铁、铝离子可与秸秆分解释放的磷形成复合物^[20]，从而减慢磷素的释放。另一方面，秸秆可能吸附从土壤中迁移至尼龙网袋中的氮磷养分^[21]，而土壤自生固氮菌的侵入也会导致秸秆氮素浓度升高^[22]。在本研究中，土壤条件对玉米、小麦秸秆氮、磷释放量的影响仅次于气候条件（平均贡献率分别为16.6%和14.8%），因此需要针对不同土壤类型确定不同气候区替代化肥氮磷养分的秸秆还田量。

3.3 秸秆条件对秸秆腐解过程中养分释放的影响

已有的大量研究表明,有机物料碳氮比、碳磷比^[12]、多酚类物质和木质素含量^[13]及其与氮含量的比值^[24]是控制有机物料腐解和养分释放的重要因素。Parton等^[25]发现在长期(10年)和跨气候带尺度上,凋落物中氮素含量是控制其氮素释放模式的首要因素。本研究发现秸秆碳氮比和氮磷比分别控制了氮素和磷素的释放量,同时其他气候条件(年均温、相对湿度)和土壤条件(土壤全氮)也影响了氮素和磷素的释放率(表4)。秸秆属性对秸秆氮、磷释放量的影响较气候和土壤条件小,同时在腐解后期(2 a)秸秆化学组成出现趋同趋势^[26],因此秸秆属性在腐解后期对养分释放的影响下降。与秸秆氮、磷的释放过程不同,秸秆钾素表现出直接释放特征(图3),在腐解0.5 a时,钾素平均释放量达89.5%,这一快速释放过程受到相对湿度、秸秆碳氮比及氮磷比的影响,但其相对作用较小(表4)。宋莉等^[27]研究发现,油菜和紫云英秸秆还田90天后钾素释放率达到95.1%~97.2%,与本研究结果相似。这可能与有机物料中钾素以无机盐(非细胞结构性物质)形式存在有关^[20]。总体上,不同气候和土壤中秸秆钾素释放率显著高于秸秆氮、磷释放率,这与秸秆中氮素和磷素以有机态或细胞壁成分存在有关^[28]。此外,在腐解后期(2~3 a),气候(年均温、相对湿度、年均降雨量)、土壤(pH、有机质、全氮)和秸秆条件(碳氮比、氮磷比、全氮)对养分释放量变异的解释率低于30%,说明其他气候、土壤和秸秆因子,以及土壤生物群落共同调控了秸秆的养分释放^[9, 29],因此需要进一步研究生物因素与其他环境因素对秸秆养分释放的交互作用。

4 结论

在寒温带、暖温带和中亚热带的黑土、潮土和红壤中,玉米和小麦秸秆分解过程中养分释放总体上表现出 $K > P \approx N$ 。秸秆氮和磷素释放主要表现出先富集后释放和直接释放两种模式,而钾素释放主要表现为直接快速释放过程。气候和土壤条件(年均温,相对湿度,土壤全氮含量)显著影响了秸秆氮素和磷素养分的释放,两者对释放量变化的贡献率随腐解时间而下降;秸秆属性(秸秆碳氮

比,秸秆氮磷比)显著影响了钾素释放,但其贡献率很小。

参考文献

- [1] Berg B, McClaugherty C. Plant litter: Decomposition, humus formation, carbon sequestration. Heidelberg: Springer, 2013
- [2] 王瑾, 黄建辉. 暖温带地区主要树种叶片凋落物分解过程中主要元素释放的比较. 植物生态学报, 2001, 25(3): 375—380
Wang J, Huang J H. Comparison of major nutrient release patterns in leaf litter decomposition in warm temperate zone of China (In Chinese). Chinese Journal of Plant Ecology, 2001, 25(3): 375—380
- [3] Talbot J M, Treseder K K. Interactions among lignin, cellulose, and nitrogen drive litter chemistry-decay relationships. Ecology, 2012, 93(2): 345—354
- [4] Cleveland C C, Reed S C, Keller A B, et al. Litter quality versus soil microbial community controls over decomposition: A quantitative analysis. Oecologia, 2014, 174(1): 283—294
- [5] Vesterdal L. Influence of soil type on mass loss and nutrient release from decomposing foliage litter of beech and Norway spruce. Canadian Journal of Forest Research, 1999, 29(1): 95—105
- [6] Aerts R. Climate, leaf litter chemistry and leaf litter decomposition in terrestrial ecosystems: A triangular relationship. Oikos, 1997, 79(3): 439—449
- [7] Berger T W, Duboc O, Djukic I, et al. Decomposition of beech (*Fagus sylvatica*) and pine (*Pinus nigra*) litter along an Alpine elevation gradient: Decay and nutrient release. Geoderma, 2015, 251/252: 92—104
- [8] 毕于运, 高春雨, 王亚静, 等. 中国秸秆资源数量估算. 农业工程学报, 2009, 25(12): 211—219
Bi Y Y, Gao C Y, Wang Y J, et al. Estimation of straw resources in China (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(12): 211—219
- [9] Sun B, Wang X Y, Wang F, et al. Assessing the relative effects of geographic location and soil type on microbial communities associated with straw decomposition. Applied & Environmental Microbiology, 2013, 79(11): 3327—3335
- [10] 迟凤琴, 匡恩俊, 宿庆瑞, 等. 不同还田方式下有机物料有机碳分解规律研究. 东北农业大学学报, 2010, 41(2): 60—65
Chi F Q, Kuang E J, Su Q R, et al. Study on organic carbon decomposition regularity of organic materials in

- different incorporation methods (In Chinese). *Journal of Northeast Agricultural University*, 2010, 41 (2): 60—65
- [11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
- Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science of Technology Press, 2000
- [12] Blair J M. Nitrogen, sulfur and phosphorus dynamics in decomposing deciduous leaf litter in the southern Appalachians. *Soil Biology & Biochemistry*, 1988, 20 (5): 693—701
- [13] 宁东峰, 马卫萍, 孙文彦, 等. 华北地区棉田翻压冬绿肥腐解及养分释放规律研究. *华北农学报*, 2011, 26 (6): 164—167
- Ning D F, Ma W P, Sun W Y, et al. Study on regulars of decomposition and nutrients releasing of green manure ploughed in cotton field in North Plain of China (In Chinese). *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2011, 26 (6): 164—167
- [14] Liu S, Wang F, Xue K, et al. The interactive effects of soil transplant into colder regions and cropping on soil microbiology and biogeochemistry. *Environmental Microbiology*, 2015, 17 (3): 566—576
- [15] 刘瑞龙, 杨万勤, 谭波, 等. 土壤动物对川西亚高山和高山森林凋落叶第一年不同分解时期 N 和 P 元素动态的影响. *植物生态学报*, 2013, 37 (12): 1080—1090
- Liu R L, Yang W Q, Tan B, et al. Effects of soil fauna on N and P dynamics at different stages during the first year of litter decomposition in subalpine and alpine forests of western Sichuan (In Chinese). *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2013, 37 (12): 1080—1090
- [16] Zhao M, Xue K, Wang F, et al. Microbial mediation of biogeochemical cycles revealed by simulation of global changes with soil transplant and cropping. *The ISME Journal*, 2014, 8 (10): 2045—2055
- [17] Agehara S, Warncke D D. Soil moisture and temperature effects on nitrogen release from organic nitrogen sources. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69 (6): 1844—1855
- [18] McLatchey G P, Reddy K R. Regulation of organic matter decomposition and nutrient release in a wetland soil. *Journal of Environmental Quality*, 1998, 27 (5): 1268—1274
- [19] Kuzyakov Y, Blagodatskaya E. Microbial hotspots and hot moments in soil: Concept & review. *Soil Biology & Biochemistry*, 2015, 83: 184—199
- [20] Bragazza L, Siffi C, Iacumin P, et al. Mass loss and nutrient release during litter decay in peatland: The role of microbial adaptability to litter chemistry. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, 39 (1): 257—267
- [21] 赵娜, 赵护兵, 鱼昌为, 等. 旱地豆科绿肥腐解及养分释放动态研究. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17 (5): 1179—1187
- Zhao N, Zhao H B, Yu C W, et al. Nutrient releases of leguminous green manures in rainfed lands (In Chinese). *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2011, 17 (5): 1179—1187
- [22] He X, Zhao S, Yang S, et al. Role of nitrogen fixing trees in mixed forest III. Leaf litter decomposition and its N release of nitrogen fixing tree species. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999 (4): 404—406
- [23] Constantinides M, Fownes J H. Nitrogen mineralization from leaves and litter of tropical plants: Relationship to nitrogen, lignin and soluble polyphenol concentrations. *Soil Biology & Biochemistry*, 1994, 26 (1): 49—55
- [24] Mafongoya P L, Giller K E, Palm C A. Decomposition and nitrogen release patterns of tree prunings and litter. *Agroforestry Systems*, 1997, 38 (1/3): 77—97
- [25] Parton W, Silver W L, Burke I C, et al. Global-scale similarities in nitrogen release patterns during long-term decomposition. *Science*, 2007, 315 (5810): 361—364
- [26] Wang X Y, Sun B, Mao J D, et al. Structural convergence of maize and wheat straw during two-year decomposition under different climate conditions. *Environmental Science and Technology*, 2012, 46: 7159—7165
- [27] 宋莉, 韩上, 鲁剑巍, 等. 油菜秸秆、紫云英绿肥及其不同比例配施还田的腐解及养分释放规律研究. *中国土壤与肥料*, 2015 (3): 100—104
- Song L, Han S, Lu J W, et al. Study on characteristics of decomposition and nutrients releasing of different proportional mixture of rape straw and Chinese milk vetch in rice field (In Chinese). *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2015 (3): 100—104
- [28] 戴志刚, 鲁剑巍, 李小坤, 等. 不同作物还田秸秆的养分释放特征试验. *农业工程学报*, 2010, 26 (6): 272—276
- Dai Z G, Lu J W, Li X K, et al. Nutrient release characteristics of different crop straws manure (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26 (6): 272—276
- [29] Schimel J, Schaeffer S M. Microbial control over carbon cycling in soil. *Frontiers in Microbiology*, 2012, 3: 348

Characteristics of Nutrient Release and Its Affecting Factors during Plant Residue Decomposition under Different Climate and Soil Conditions

LI Changming^{1, 2} WANG Xiaoyue¹ SUN Bo^{1†}

(*1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*)

(*2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract 【Objective】 Nutrient release during the decomposition of organic materials in soils is an important process in the nutrient element biogeochemical cycle, which could be used as substitute for chemical fertilizer. It is a fundamental to build the best straw returning practices to know the coupling characteristics and mechanism for nutrient release during straw decomposition under different climate and soil conditions. 【Method】 In this study, we transplanted neutral black soil (Phaeozem), alkaline chao soil (Cambisol) and acidic red soil (Acrisol) in cold-temperate, warm-temperate and mid-subtropical zones, respectively and setup the Soil Reciprocal Transplant Experiment. Wheat and maize straws were packed in 200-mesh nylon bags and buried at the depth of 10~20 cm in three types of soils in parallel in three climate regions, and then sampled at 0.5-, 1-, 2- and 3-years of decomposition. The effects of climate, soil and straw condition on nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) release associated with the decomposition were examined. 【Result】 The results showed similar releasing patterns for nitrogen and phosphorus. In cold temperature zone, the N and P nutrients released in the pattern of an enrichment stage followed by a release stage, while in warm temperature and subtropical zones they showed a continuously release pattern. The N and P released directly in Phaeozem but enriched firstly then released in Cambisol and Acrisol. The K were released directly during the 3-year decomposition, and the mean K release rate (Ft_K , percentage of total K in wheat straw or maize stalk residue to that in the straw applied) amounted to $89.5\% \pm 1.1\%$ in the first half year. During the 3-year decomposition, the nutrient release rate decreased followed the sequence of $K > P \approx N$. Climate conditions contributed to $19.5\% \pm 5.3\%$ and $19.5\% \pm 5.0\%$ of variation for N and P release amount, while soil conditions to $16.6\% \pm 6.5\%$ and $13.8\% \pm 7.0\%$, respectively. Meanwhile the contribution of climate and soil conditions to the variation of nitrogen and phosphorus release amount decreased with the decomposition going on. The K release was significantly but slightly affected by the straw conditions which contributed to only about $2.23\% \pm 0.07\%$ of variation. Among the interaction effect of these factors, the climate \times straw and soil \times straw affected significantly the N and P release amount. At later decomposition stages (2-3 years of decomposition), the total contribution of all factors (climate, soil and straw) to the variation of the nutrient release was less than 30%, which suggested that the other environmental factors, especially the biological factor, may play an important role during the process of nutrient releasing. The stepwise regression equations between nutrient release rate and climate, soil and straw factors were $Y_{t_N} = -3.41 - 0.40C/N + 0.49TN + 0.43AT$ ($R^2=0.67$, $p=0.001$), $Y_{t_P} = -83.73 + 0.49RH + 0.42TN + 0.25N/P$ ($R^2=0.47$, $p=0.003$), and $Y_{t_K} = 2574.39 - 0.87C/N - 0.33N/P - 0.30RH$ ($R^2=0.62$, $p=0.002$) for N, P and K, respectively. In which, AT stands for annual mean temperature; RH for relative humidity; C/N for carbon/nitrogen in straw; TN for soil total nitrogen content; N/P for nitrogen/phosphorus in straw. 【Conclusion】 In general, during the 3-year decomposition of wheat and maize straw under different climate

and soil conditions, the N and P were released mainly in the pattern of an enrichment stage followed by a release stage, or in a continuously release pattern. However, the K was released all in a direct and faster pattern. The climate and soil conditions are the main controlling factors for N and P release, while the straw quality was the main factor influencing the K release.

Key words Straw; Decomposition; Nutrient release; Climate condition; Soil type

(责任编辑：陈德明)