

旱地夏闲期间土壤氮素矿化特性的变化

马乐乐,夏梦洁,蒋永吉,周建斌

(西北农林科技大学资源环境学院,农业部西北植物营养与农业环境重点实验室,陕西 杨凌 712100)

摘要:采用间歇淋洗好气培养法测定了黄土区旱地不同土壤及施氮量下夏季休闲前后土壤氮素矿化累积量,分析了旱地夏休闲期间土壤氮素矿化特性的变化。结果表明:与休闲前相比,休闲后土壤氮素矿化累积量显著降低,长武及杨凌试点土壤分别降低了 29.52% 及 7.15%;长期不施氮肥处理休闲后土壤累积矿化氮量显著降低,而长期施用氮肥处理休闲前后土壤累积矿化氮量间的差异未达显著水平。相关分析表明,休闲前土壤氮素矿化累积量与土壤有机质、全氮含量间有显著正相关关系。采用双组分一级动力学方程拟合的土壤易矿化氮矿化势休闲前后长武及杨凌试点土壤分别降低了 85% 及 66%,可见夏季休闲显著促进了旱地土壤易矿化氮的矿化。

关键词:夏休闲;旱地;氮素矿化累积量;氮矿化势

中图分类号: S153.6; S158.2 **文献标志码:** A

Change of soil nitrogen mineralization in dryland during the summer fallow

MA Le-le, XIA Meng-jie, JIANG Yong-ji, ZHOU Jian-bin

(College of Natural Resource and Environment, Northwest A&F University, Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, MOA, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The Stanford and Smith aerobic incubation method was used to study the changes of nitrogen (N) mineralization from soils from farmer's fields and by nitrogen application treatments before and after summer fallow in the Loess Plateau. Compared to that before summer fallow, soil N mineralization after summer fallow in Changwu and Yangling was decreased by 29.52% and 7.15%, respectively. The cumulative mineralized N also was decreased significantly in long-term non-N fertilization after summer fallow. However, significant differences were detected for the two different N fertilization treatments. Correlation analysis showed significant positive correlations between the cumulative mineralized N and soil organic matter and total N before summer fallow. Two pools of first-order kinetic equation were used to model the curves of N mineralization from different soils. The results indicated that mineralized N potential (N_1) in soils of Changwu and Yangling after summer fallow were decreased by 85% and 66%, respectively. Therefore, summer fallow significantly reduced the mineralization of N in soil.

Keywords: summer fallow; dry land; cumulative mineralized N; N mineralization potential

我国北方旱区面积广大,占全国耕地的 1/3^[1]。黄土高原是我国北方主要旱作区,也是我国旱地小麦的主产区,其中陕西、甘肃、宁夏以及山西小麦的播种面积占全国小麦总面积的 12.5%^[2]。由于受水资源缺乏的制约,黄土高原旱地多采取夏季休闲的方式,即夏季作物(主要为小麦)收获后,耕翻土壤,以蓄纳雨水,恢复地力,当地农民称这一措施为“夏耕晒垡”,或“伏耕晒垡”。有统计显示,黄土高原区夏季休闲地面积逾 200 万 hm^2 ,占该区耕地面积的 2/5 左右^[3]。这一措施在黄土区具有悠久的历

史,距今两千余年,我国现存最早的农书“汜胜之书”就有这一方面的记载^[4]。至今我国北方旱地产麦区仍有“伏里翻晒田,赛过水浇园”的农谚^[5],说明夏耕晒垡在恢复地力、保证旱地小麦丰产稳产方面具有重要作用。

但夏季休闲期间气温高、降雨量充足,养分特别是氮素容易发生损失^[5-6]。自 20 世纪 80 年代以来,随着农业生产中氮肥用量的增加,作物收获后残留在土壤中的肥料氮随之增加,夏季休闲期间氮素的淋溶损失已引起一些研究者的关注^[7-8]。应该看

收稿日期:2015-01-08

基金项目:国家自然科学基金项目(31372137)及国家“十二五”科技支撑计划课题(2012BAD15B04)

作者简介:马乐乐(1988—),女,甘肃礼县人,硕士研究生,研究方向为植物营养与调控。E-mail: malelemml@163.com。

通信作者:周建斌(1964—),男,教授,主要从事植物营养与旱地水肥调控研究。E-mail: jbzhou@nwsuaf.edu.cn。

到,休闲期间的高温与多雨也会促进土壤有机氮库的矿化,释放的氮素可能增加氮素损失的风险,但关于夏季休闲前后对土壤有机氮矿化特性的定量研究还少见报道。因此,本研究采用评价土壤氮素矿化特性的常用方法——Stanford 间歇淋洗法^[9],研究了旱地冬小麦夏季休闲前后耕层土壤有机氮矿化特性的变化以及施肥量对它的影响,旨在为旱地土壤氮素管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土样分别于 2013 年小麦收获后及夏季休闲结束后采集于陕西省长武县洪家镇王东村和陕西杨凌西北农林科技大学农作一站。陕西省长武县王东村(东经 107°40′、北纬 35°14′)位于黄土高原中南部典型旱作农业区。该地区海拔 1 227 m,地势平坦,多年平均降雨量为 580 mm,季节间差异较大,降水主要集中在 7—9 月,年均蒸发量 1 500 mm;年均气温 9.1℃,无霜期 171 d。土壤为黄盖粘黑垆土。小麦收获后在该村不同位置随机选取 5 个田块(分

别用 A、B、C、D 及 E 表示),旨在代表研究区域土壤肥力及施肥状况;同一田块多点采集耕层土壤样品,组成混合样;休闲结束后再采集相应田块土壤样品。休闲前后的土样采集时间分别为 2013 年 7 月 8 日及 9 月 5 日。休闲期间(2013-07-08—2013-09-05)的降雨量为 287.1 mm。

陕西杨凌西北农林科技大学农作一站位于黄土高原南部,地处渭河三级阶地,海拔 520 m 左右,年平均气温 12.9℃,降雨量 632 mm 左右,且主要集中于 7、8、9 三个月,年均蒸发量为 1 400 mm,属于半湿润易干旱地区,土壤类型为土垫旱耕人为土。本试验以连续 11 年的肥料及栽培模式长期定位试验不同处理土壤为研究对象,采集该试验常规栽培模式下 3 个施氮水平(即 0, 120 kg·hm⁻²和 240 kg·hm⁻²)的耕层土壤为供试土样。休闲前后的采样时间分别为 2013 年 6 月 12 日及 9 月 27 日。休闲期间(2013-06-12—2013-09-27)的降雨量为 207.4 mm。

土样采回后采用常规方法处理,测定土壤有机质及全氮含量(表 1)。

表 1 供试土样耕层土壤有机质、全氮含量

Table 1 Contents of organic matter and total nitrogen in different soil samples

指标 Index	时间 Time	杨凌 Yangling			长武 Changwu				
		N ₂₄₀	N ₁₂₀	N ₀	A	B	C	D	E
有机质 SOM/(g·kg ⁻¹)	休闲前 Before fallow	13.69	13.29	13.21	14.38	13.69	13.55	14.29	13.44
	休闲后 After fallow	14.37	13.93	13.85	14.91	13.88	13.10	14.80	13.06
全氮 TN/(g·kg ⁻¹)	休闲前 Before fallow	0.84	0.79	0.81	0.88	0.84	0.82	0.90	0.80
	休闲后 After fallow	0.90	0.85	0.86	0.93	0.88	0.82	0.91	0.80

1.2 好气培养试验

以上述供试土壤为对象,采用 Stanford 和 Smith^[10]提出的好气培养法测定土壤矿化氮含量。具体方法为:称取 15 g 风干土样与等量石英砂混合,用玻璃棒搅拌均匀后,将此混合物放在预先内置一个玻璃球、15 g 石英砂、上垫一层玻璃丝的 50 ml 培养管内。混合物加入后,再在上面盖一层玻璃丝和石英砂,以防淋洗时冲溅土壤,装好后轻震几下。用 100 ml 0.01 mol·L⁻¹的 CaCl₂ 分 4 次淋洗土壤中起始矿质氮。此后加入 25 ml 无氮营养液(0.002 mol·L⁻¹ CaSO₄·2H₂O; 0.002 mol·L⁻¹ MgSO₄; 0.005 mol·L⁻¹ Ca(H₂PO₄)₂; 0.0025 mol·L⁻¹ K₂SO₄ 的混合液)。培养管用塑料膜密封,多余水分在 6 kPa 负压下抽去。然后,在塑料膜上扎两个小孔,保持试管良好通气。培养管置 35℃ ± 1℃ 恒温培养箱中,预培养 1 周后,如上法淋洗矿化氮、加无氮营养液和抽气,然后继续培养,并于设定时间再次淋洗其矿化

氮。各次淋洗液分别收集,测定其中的矿化氮(NO₃⁻ - N + NH₄⁺ - N),测定结果分别记录。

本试验分别于培养后 1、2、4、6、8、10、14、16、20、24、28 周和 32 周进行淋洗,并收集淋洗液,用连续流动分析仪测定其中 NO₃⁻ - N 和 NH₄⁺ - N 的含量。

1.3 数据处理

采用 Richter 与 Nuske(1980)提出的双组分模型拟合,将土壤氮素矿化过程分为易矿化及难矿化两部分,即:

$$N_t = N_1[1 - \exp(-k_1 t)] + N_2[1 - \exp(-k_2 t)]$$

式中, N_1 与 N_2 分别为易矿化氮矿化势和难矿化氮矿化势; k_1 、 k_2 分别为易、难矿化速率^[11-12]。易矿化氮矿化势 N_1 指土壤易矿化氮部分最大矿化量,其矿化速率 k_1 较高,表征土壤在较短时间内的供氮能力,对于评价土壤氮素矿化损失量有重要价值;难矿化氮矿化势 N_2 表征土壤难矿化氮部分最大矿化量,其矿化量较高但矿化速率 k_2 很小,表征土壤在较长

时间内的供氮能力^[13]。

所有数据采用 Excel 2007、Sigmaplot12.5 及 SAS Version 8.1 for Windows 软件进行计算和统计分析。

2 结果与分析

2.1 夏休闲对长武试点旱地农田土壤氮素矿化的影响

由图 1 可以看出,五块农田休闲前土壤培养 32 周氮素矿化累积量在 95.60 ~ 140.60 mg·kg⁻¹之间,

平均 107.42 mg·kg⁻¹,休闲前土壤矿化累积量较高,约占土壤全氮的 12.79%;休闲后为 63.66 ~ 97.97 mg·kg⁻¹,平均 75.71 mg·kg⁻¹,占土壤全氮的 9.01%,比休闲前降低了 31.71 mg·kg⁻¹,降低幅度为 29.52%。各培养时期土壤氮素矿化累积量均为休闲前高于休闲后,方差分析显示各样地氮素矿化累积量休闲前与休闲后均达到显著差异($P < 0.05$)。

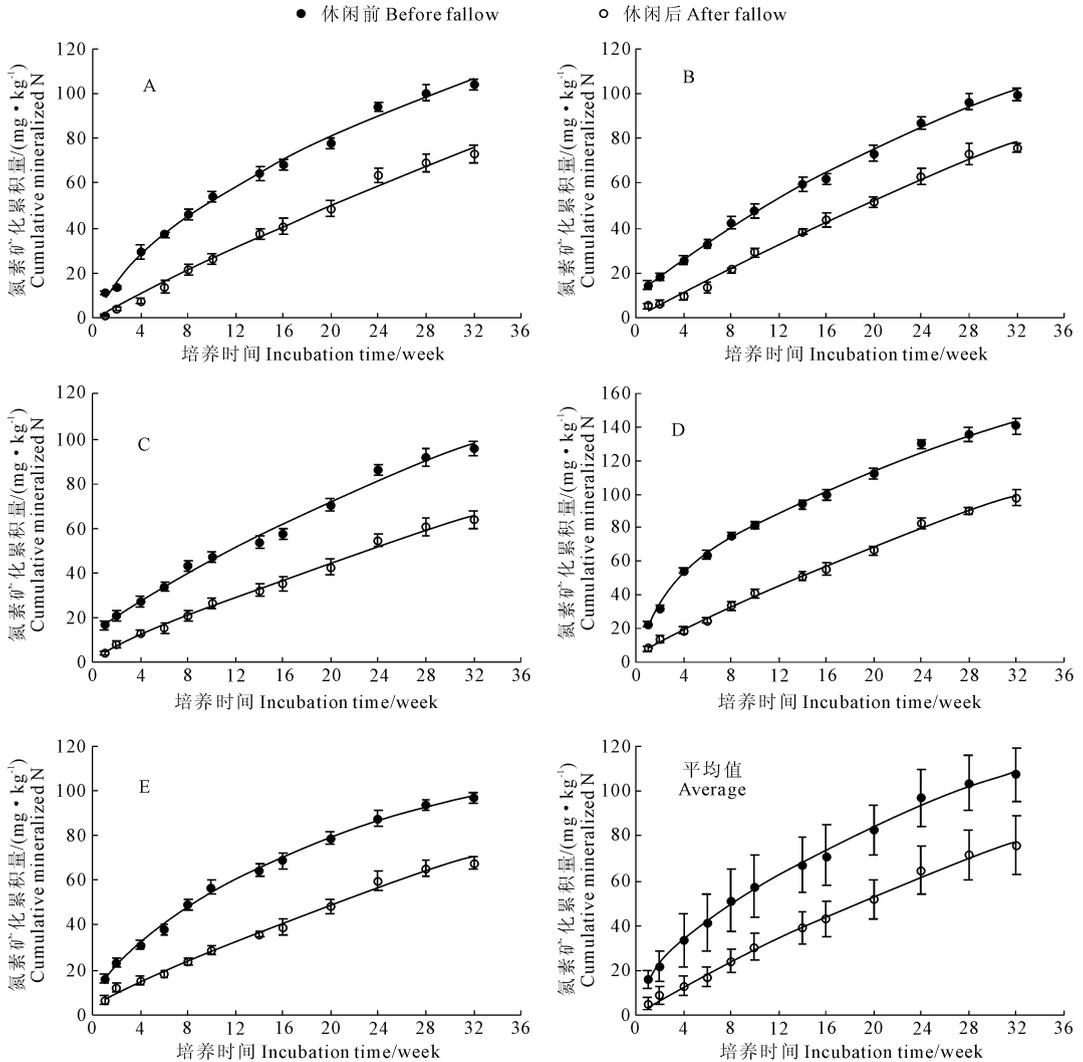


图 1 夏季休闲前后长武试点不同田块土壤氮素矿化累积量的变化

Fig. 1 Changes of cumulative mineralized N in different farmlands soil during the summer fallow season (Changwu)

利用双组分模型对休闲前后土壤氮素矿化累积量拟合的氮素矿化参数见表 2。可以看出,双组分模型可以很好地拟合土壤氮素矿化过程,模拟方程及参数均达到显著水平(R^2 为 0.993 ~ 0.997)。休闲后各田块土壤易矿化氮矿化势均明显降低,休闲前在 10.57 ~ 44.03 mg·kg⁻¹范围,休闲后降低到 0 ~ 5.45 mg·kg⁻¹,其中田块 D 的降低最多,从 40.02 mg

·kg⁻¹降低到 5.31 mg·kg⁻¹;而休闲后各田块土壤难矿化氮矿化势均明显增加,平均由休闲前的 151.62 mg·kg⁻¹增加到 170.44 mg·kg⁻¹。

2.2 夏休闲对不同施氮量下土壤氮素矿化的影响

由图 2 可以看出,夏季休闲对不同施氮处理土壤氮素累积矿化量的影响不同,长期未施氮肥处理(N_0)休闲后土壤氮素累积矿化量显著降低,降低幅

度达 24.98%；而长期施用氮肥处理(N_{120} 和 N_{240})休闲前后土壤氮素矿化累积量无显著变化。与 N_{120} 相

比, N_{240} 处理土壤氮素累积矿化量也未表现出增加的趋势。

表 2 长武试点不同田块土壤氮素矿化的一级动力学方程参数

Table 2 Comparison of potential and constant rate of N mineralization (Changwu)

农田 Samples	时间 Time	易矿化氮矿化势 Easily mineralized N potential N_1 /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	难矿化氮矿化势 Persistently mineralized N potential N_2 /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	易矿化氮矿化速率 Easily mineralized rate k_1 /week $^{-1}$	难矿化氮矿化速率 Persistently mineralized rate k_2 /week $^{-1}$	R^2
A	休闲前 Before fallow	18.27	167.73	0.326	0.023	0.996
	休闲后 After fallow	0.00	297.22	0.000	0.009	0.995
B	休闲前 Before fallow	10.57	170.66	3.942	0.024	0.997
	休闲后 After fallow	0.00	267.88	0.000	0.011	0.993
C	休闲前 Before fallow	14.94	211.37	2.306	0.016	0.993
	休闲后 After fallow	3.83	251.47	1.221	0.009	0.994
D	休闲前 Before fallow	40.02	183.31	0.504	0.026	0.996
	休闲后 After fallow	5.31	268.25	2.376	0.014	0.995
F	休闲前 Before fallow	13.32	107.97	1.867	0.047	0.997
	休闲后 After fallow	5.45	215.21	1.986	0.011	0.994
均值 Average	休闲前 Before fallow	17.63	151.62	0.885	0.029	0.996
	休闲后 After fallow	0.00	170.44	0.000	0.019	0.994

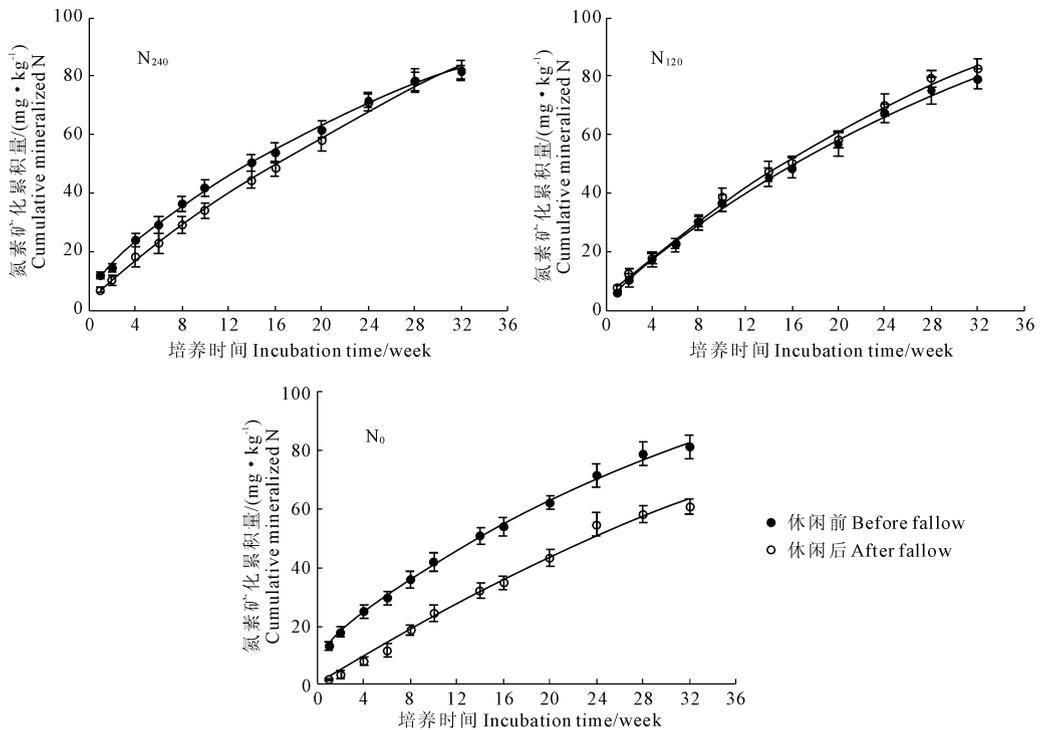


图 2 夏季休闲前后杨凌试点不同施氮量土壤氮素矿化累积量的变化

Fig.2 Changes of cumulative mineralized N in different soils during the summer fallow season (Yangling)

由双组分模型拟合的休闲前后土壤氮素矿化参数(表 3)可以看出,休闲后不同施氮处理土壤易矿化氮矿化势明显降低,其中 N_0 处理降低幅度显著高于其它处理,休闲前其易矿化氮矿化势为 11.86

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,休闲后则降为 0; N_{240} 和 N_{120} 处理休闲后较之休闲前分别降低了 $5.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.47 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;而休闲后各处理土壤难矿化氮矿化势均明显增加, N_{240} 、 N_{120} 和 N_0 处理分别增加了 63.74、11.99

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $46.04 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, N_{240} 处理增加幅度最大。氮矿化势均有不同程度增加。与 N_{120} 相比, N_{240} 处理土壤易矿化氮矿化势及难矿化

表 3 不同氮肥处理土壤氮素矿化的一级动力学方程参数(杨凌)

Table 3 Comparison of potential and constant rate of N mineralization (Yangling)

处理 N levels	时间 Time	易矿化氮矿化势 Easily mineralized N potential N_1 /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	难矿化氮矿化势 Persistently mineralized N potential N_2 /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	易矿化氮矿化速率 Easily mineralized rate k_1 (week^{-1})	难矿化氮矿化速率 Persistently mineralized rate k_2 (week^{-1})	R^2
N_{240}	休闲前 Before fallow	9.86	116.91	1.509	0.031	0.998
	休闲后 After fallow	4.56	180.65	1.318	0.018	0.997
N_{120}	休闲前 Before fallow	5.18	137.46	0.596	0.025	0.998
	休闲后 After fallow	4.71	149.45	2.480	0.024	0.996
N_0	休闲前 Before fallow	11.86	119.89	1.745	0.028	0.998
	休闲后 After fallow	0.00	165.93	0.000	0.015	0.992

2.3 土壤氮素矿化累积量与土壤有机质、全氮间的相关性

相关分析发现(图 3), 休闲前土壤氮素矿化累

积量与土壤有机质、全氮含量呈显著正相关关系, 而休闲后土壤氮素矿化累积量与土壤有机质、全氮含量的相关性未达显著水平。

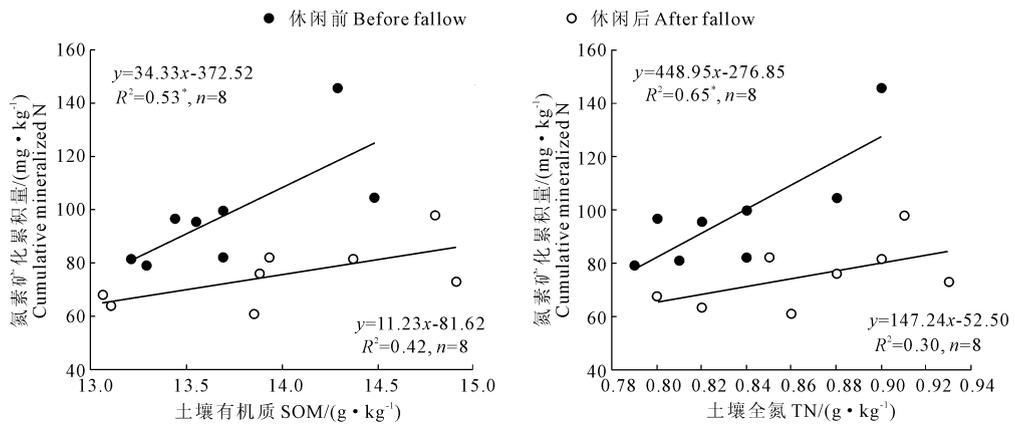


图 3 休闲前后土壤氮素矿化累积量与土壤有机质、全氮的相关性

Fig. 3 Correlation between cumulative mineralized N and SOM, TN during the summer fallow

3 讨论

3.1 旱地夏休闲前后土壤氮素矿化特性

本研究发现, 与休闲前相比, 休闲后土壤氮素累积矿化量多不同程度降低, 这与夏季休闲期间高温多雨, 利于土壤有机氮矿化有关, 说明采用夏季休闲, 会增加土壤有效氮含量, 改善土壤氮素供应, 这与前人的研究结果一致^[5-6]。与前人相比, 本研究应用 Richter 与 Nuske^[11-12]提出的双组分一级动力学模型拟合了休闲前后土壤氮素矿化特性。该模型将土壤有机氮分为易矿化和难矿化两部分, 易矿化氮矿化势指土壤易矿化氮部分最大矿化量, 表征土壤较短时间内的供氮能力, 对于评价土壤氮素矿化损失量有重要价值; 难矿化氮矿化势指土壤难矿化氮部分最大矿化量, 可以表征土壤在较长时期内

的潜在供氮能力^[13]。可以看出, 夏季休闲主要降低了土壤易矿化氮的矿化势。

本研究同时发现, 休闲前土壤氮素矿化累积量与土壤有机质、全氮含量呈显著正相关关系, 这与其他学者的研究结果一致^[14-15], 说明土壤有机质含量越高, 土壤氮素矿化累积量越高。而休闲后土壤氮素矿化累积量与土壤有机质、全氮含量的相关性未达显著水平, 这与休闲后土壤易矿化氮的矿化释放有关。

与休闲前相比, 除杨凌试点长期施用氮肥处理 (N_{120} 及 N_{240})外, 其他土样休闲后土壤氮素累积矿化量降低幅度在 25% ~ 30% 之间。矿化的氮素转化为矿质氮, 一方面改善了土壤有效氮的含量; 另外一方面, 由于夏闲期间高温多雨, 土壤矿质氮含量的大量增加也增大了氮素损失的风险。赵伟^[18]的研究

发现,黄土高原南部不同肥力旱地土壤夏季休闲期间损失的氮素占小麦收获后残留肥料氮量的比例在 19%~48% 之间。一些研究发现^[19-20],休闲期地表覆盖或种植一些生长期较短填闲植物可以减少水分入渗,从而减少氮素淋失。因此,有必要进一步研究黄土区旱地夏季休闲期间矿化氮的去向及调控技术。

不同地点相比,休闲前长武黑垆土土壤氮素矿化累积量和易矿化氮矿化势均比杨凌塬土高,休闲后长武土壤氮素矿化累积量和易矿化氮矿化势降低幅度也高于杨凌塬土,这与不同地点土壤有机质含量等有关。同时,有研究表明^[16-17],土壤氮素矿化与土壤质地及气候因素有关,因此,杨凌与长武两地土壤质地和气候因素的差异也是其休闲前后土壤有机氮矿化特性差异的原因之一。

3.2 夏休闲对不同施氮量下土壤氮素矿化的影响

王媛等^[21]对陕西关中地区小麦-玉米轮作一年两熟体系土壤氮素矿化特性的研究发现,与长期未施肥土壤相比,长期施用 NPK 肥显著提高了这一体系土壤供氮强度。而本研究中,与长期未施用氮肥处理相比,长期施用氮肥处理(N₁₂₀及 N₂₄₀)并未显著增加土壤氮素矿化累积量,这可能与小麦-玉米轮作体系一年两熟,归还土壤有机物含量高有关^[7]值得注意的是,长期未施用氮肥处理(N₀)夏休闲后土壤氮素矿化累积量明显降低,而长期施用氮肥处理(N₁₂₀及 N₂₄₀),休闲前后土壤氮素矿化累积量无显著差异;双组分一级动力学模型的拟合结果表明,休闲后 N₁₂₀及 N₂₄₀处理土壤易矿化氮的含量虽然有所降低,但其值仍然高于长期未施氮肥处理(N₀),说明长期施用氮肥在一定程度上改善了土壤供氮能力,提高了土壤氮库的缓冲能力,相应的机理值得进一步研究。

3.3 好气培养法与双组分一级动力学模型应用效果

本研究是在室内特定条件下进行的培养试验,其温度和湿度均利于微生物的活动,促进氮素的矿化,氮素矿化累积量要高于田间实际情况,但其对氮素矿化性能的测定是有价值的。李生秀研究表明^[9]Stanford 间歇淋洗法培养所矿化的氮素与作物吸氮量或对氮肥反应有非常密切关系,可以较好地体现土壤的供氮能力。模型拟合结果表明,双组分模型可以很好地拟合土壤氮素矿化过程,模拟方程及参数均达到显著水平, R² 均在 0.99 以上。模型拟合只能预测土壤氮素矿化总的趋势,并不能反映某一

阶段矿化量的变化,但能在种植作物以前估计出土壤氮素净矿化量确定土壤氮素矿化潜势^[22];同时双组分模型拟合得到的氮素矿化势可以反映土壤有机氮库各组分矿化动态^[11-12],许多研究表明双组分模型对氮素矿化累积有更好的模拟效果,特别是对全氮含量较高的黄土地区土垫早耕人为土氮素矿化过程拟合效果相对较好^[14,16]。所以本研究通过培养试验得到休闲前后土壤氮素矿化特性,可以在一定程度反映黄土区旱地农田夏休闲期氮素的矿化情况以及影响因素,了解夏休闲对土壤氮素养分活化的作用,为该地区田间氮素管理提供一定的理论依据。

4 结 论

休闲前土壤氮素矿化累积量与土壤有机质、全氮呈显著正相关关系。与休闲前相比,休闲后土壤氮素累积矿化量多不同程度降低,这与夏季休闲期间高温多雨,利于土壤有机氮矿化有关;采用双组分一级动力学模型拟合结果表明,夏季休闲主要降低了土壤易矿化氮的矿化势。黄土区旱地夏季休闲期间矿化氮的去向问题值得关注。

参 考 文 献:

- [1] 刘晓宏,郝明德,田梅霞.土壤矿质氮和可矿化氮对当季作物的贡献[J].土壤与环境,2001,10(3):207-209.
- [2] 李菊梅,王朝辉,李生秀.有机质、全氮和可矿化氮在反映土壤供氮能力方面的意义[J].土壤学报,2003,40(2):232-238.
- [3] 朱兆良,金继运.保障我国粮食安全的肥料问题[J].植物营养与肥料学报,2013,19(2):259-273.
- [4] 石声汉.氾胜之书今释[M].北京:科学出版社,1956.
- [5] 李鸿恩,杨运莲.夏耕晒垡的增产作用[J].土壤学报,1965,13(4):404-410.
- [6] 彭琳,彭祥林,卢宗藩.塬土旱地土壤硝态氮季节性变化与夏季休闲的培肥增产作用[J].土壤学报,1981,18(3):212-222.
- [7] 梁斌.有机肥与化肥长期配施协调土壤供氮的效应及机理[D].杨凌:西北农林科技大学,2012.
- [8] 章孜亮,刘金山,王朝辉,等.基于土壤氮素平衡的旱地冬小麦监控施氮[J].植物营养与肥料学报,2012,18(6):1387-1396.
- [9] 李生秀,付会芳,肖俊璋,等.几种测氮方法在反映旱地土壤供氮能力方面的效果[J].干旱地区农业研究,1992,10(2):72-81.
- [10] Stanford G, Smith S. Nitrogen mineralization potentials of soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1972,36(3):465-472.
- [11] Richter J, Nuske A, Boehmer M, et al. Simulation of nitrogen mineralization and transport in loess - parabraunearthes: Plot experiments [J]. Plant and Soil, 1980,54(3):329-337.
- [12] Richter J, Nuske A, Habenicht W, et al. Optimized N - mineralization parameters of loess soils from incubation experiments[J]. Plant and Soil, 1982,68(3):379-388.

- [8] 杨淑静,张爱平.宁夏灌区农业非点源污染情况调查与原因分析[J].干旱地区农业研究,2009,27(5):1-5.
- [9] 张爱平.宁夏引黄灌区稻田退水氮磷污染研究[D].北京:中国农业科学院,2009.
- [10] 张爱平,杨世琦.不同供氮水平对春小麦产量、氮肥利用率及氮平衡的影响[J].中国农学通报,2009,25(17):137-142.
- [11] 张夫道.正确认识现代农业中的有机肥料问题[J].农资科技,2003,(5):8.
- [12] 杨淑静,张爱平.农业非点源污染现状分析及国内外研究进展[J].中国农业气象,2009,30(增1):82-85.
- [13] 朱兆良,孙波.中国农业面源污染的控制对策研究[J].环境保护,2008,4(4):4-6.
- [14] Chen X P, Cui Z L, et al. Integrated social crop system management for food security[J]. PNAS, 2011,108(16):6399-6404.
- [15] Li L, Zhang F S, Sun J H. Intercropping with wheat leads to greater root weight density and larger below ground space of irrigated maize at late growth stages[J]. Soil Science and PlantNutrition, 2011,57(1):61-67.
- [16] Xia H Y, Chao J H, Sun J H, et al. Dynamics of root length and distribution and Shoot biomass of maize as affected by Inter-cropping with different companion crops and phosphorus application rates[J]. Field Crops Research, 2013,150:52-62.
- [17] 李花,葛玮健,马晓霞,等.小麦-玉米轮作体系长期施肥对土壤微生物量碳、氮及酶活性的影响[J].植物营养与肥料学报,2011,17(5):1140-1146.
- [18] 王立刚,李虎,杨黎,等.冬小麦/夏玉米轮作系统不同施氮量的长期环境效应及区域氮调控模拟[J].中国农业科学,2013,46(14):2932-2941.
- [19] 何铁光,秦芳,苏天明,等.不同栽培模式对氮磷钾养分径流流失的影响[J].水土保持研究,2014,21(1):95-99.
- [20] 郭步庆,陶洪斌,盛耀辉.华北平原不同种植模式的水氮利用[J].玉米科学,2013,21(6):95-100,106.
- [21] 邓小燕,王小春,杨文钰.玉米/大豆和玉米/甘薯模式下玉米磷素吸收特征及种间相互作用[J].作物学报,2013,39(10):1891-1898.
- [22] 刘根红,许强,康建宏,等.基于低污染的宁夏引黄灌区 13 种种种植模式氮磷平衡分析[J].干旱地区农业研究,2012,30(2):1-7.
- [23] 唐启义.实用统计分析及其 DPS 数据处理系统[M].北京:科学出版社,2002:464-480.

(上接第 92 页)

- [13] 付会芳,李生秀.土壤氮素矿化与土壤供氮能力——Ⅲ.旱地土壤氮素矿化的数学模型[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),1992,20(S1):59-62.
- [14] 李慧琳,韩勇,蔡祖聪.上海地区水稻土氮素矿化及其模拟[J].土壤学报,2004,41(4):503-510.
- [15] 邵兴芳,徐明岗,张文,等.长期有机培肥模式下黑土碳与氮变化及氮素矿化特征[J].植物营养与肥料学报,2014,20(2):326-335.
- [16] 卢红玲,李世清,金发会,等.黄土高原石灰性土壤长期间隙淋洗淹水培养下的氮素矿化过程及其模拟[J].中国农业科学,2008,41(10):3140-3148.
- [17] 严德翼,周建斌,邱桃玉,等.黄土区不同土壤类型及土地利用方式对土壤氮素矿化作用的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2007,35(10):103-109.
- [18] 赵伟.不同肥力土壤残留肥料氮去向及其机理的研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2014.
- [19] 李光,高志强,孙敏,等.休闲期覆盖和施氮量对旱地小麦幼苗生理特性的影响[J].中国农学通报,2012,28(3):47-50.
- [20] 赵刚,樊廷录,李尚中,等.夏休闲期复种油菜对旱地土壤水分和小麦产量的影响[J].应用生态学报,2013,24(10):2807-2813.
- [21] 王媛,周建斌,杨学云.长期不同培肥处理对土壤有机氮组分及氮素矿化特性的影响[J].中国农业科学,2010,43(6):1173-1180.
- [22] 巨晓棠,刘学军,张福锁.冬小麦/夏玉米轮作体系中土壤氮素矿化及预测[J].应用生态学报,2003,14(12):2241-2245.