

土壤水分对包膜尿素养分释放特性的影响^①

高帅帅^{1,2}, 王火焰^{1*}, 周健民¹, 赵信林^{1,2}, 刘晓伟^{1,2}, 陈照明^{1,2}

(1 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: 试验采用土壤培养的方法, 以释放期分别为 60 d(肥料 A)和 90 d(肥料 B)的两种肥料作为供试肥料, 研究了土壤绝对含水量、干湿交替、相对含水量和水势因素对 3 种土壤中包膜尿素养分释放特性的影响。结果表明: 在 3 种土壤中, 土壤绝对含水量从 50 g/kg 增到 200 g/kg 时, 包膜尿素养分释放率均随土壤水分含量的增加而显著增加, 此时水分因素是控制包膜尿素养分释放的主要因素。在干湿交替条件下, 两种供试肥料间释放率的差异变大, 其中肥料 B 在潮土中释放速率较其他两种土壤中下降更多。当相对含水量在 0%~50% 田间持水量范围内, 或水势在 60~100 kPa 范围内时, 供试肥料在红壤中的释放显著低于潮土和水稻土, 这与红壤中黏粒含量高有关; 当相对含水量大于 100% 田间持水量时, 或水势低于 60 kPa 时, 土壤水分和土壤类型对包膜尿素养分释放的影响基本不再显著。常用的 Sugihara 方程可以较好地拟合包膜尿素在试验设定水分条件下的养分释放特性, 相关系数 $r > 0.95$ 。3 种不同土壤水分参数均可以用来预测包膜尿素的释放率和释放期, 其中水势(x)与包膜尿素释放期(y)的拟合效果最好, 关系式为 $y=64.79e^{0.0066x}$, $r=0.91$ 。

关键词: 养分释放; 包膜尿素; 水分; 干湿交替; 拟合

中图分类号: S143.1+5 文献标识码: A

氮是植物生命活动所必需的营养元素之一, 它在农业生产活动中的作用是不可替代的。目前我国化肥的利用率远远落后于发达国家^[1-2], 过多的氮肥投入, 不仅造成大量资源和能源的浪费^[3-4], 还带来了严重的环境问题^[5-6], 威胁我国粮食生产安全。缓控释肥能够节氮减排^[7], 降低氮素损失^[8-13], 为解决这一难题提出了可实现思路和途径, 也是今后化学肥料的发展方向之一^[14]。

影响包膜尿素养分在土壤中释放的因素很多, 例如 pH^[15]、土壤水分^[16]、土壤微生物^[17]、土壤温度^[18]、土体构型^[19]和土壤类型^[20]等, 土壤水分是其中的一个重要影响因素。关于水分因素对包膜尿素在土壤中养分释放特性影响的研究, 前人已做过一些研究^[21-28]。毋永龙等^[21]的研究结果显示, 土壤含水量为田间持水量的 35%~100% 时, 对 3 种复合改性矿物包膜尿素的氮素释放无显著性差异。施卫省等^[22]以水冬瓜果油为包膜材料, 用云南红壤研究了 200~350 g/kg 土壤含水量对包膜肥料释放特性的影

响, 认为初始含水量越高, 水冬瓜包膜尿素养分累计溶出率增加越快。肖剑等^[23]认为当土壤含水量为 23 g/kg (相当田间持水量的 7.7%), 即土壤水势在 100 MPa 以上时, 包膜型控释肥料的养分完全不能释放。虽然研究包膜尿素释放特点的资料很多, 但由于各研究采用的肥料种类、土壤类型、土壤含水量不同, 结论也不尽相同。当前, 树脂包膜尿素应用广泛, 因此, 本试验以树脂包衣的包膜尿素为材料, 拟合模型, 进一步研究土壤水分对包膜尿素养分释放特性的影响。此外, 土壤含水量不是恒定不变的, 它随环境变化而变化, 干湿交替对包膜尿素在土壤中养分释放影响的研究并不多见, 因此, 本试验也对干湿交替条件下包膜尿素养分的释放特性进行了初步研究。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验供试肥料为无锡市惠山区玉祁工业园区保利化肥有限公司和金正大肥料公司提供的两种树

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2013CB127401)、国家自然科学基金项目(41271309)和江苏省科技支撑计划项目(BE2011821)资助。

* 通讯作者(hywang@issas.ac.cn)

作者简介: 高帅帅(1991—), 女, 山东威海人, 硕士研究生, 主要从事氮肥养分高效利用方面的研究。E-mail: ssg@issas.ac.cn

脂包膜肥料,分别记做肥料 A、肥料 B,其释放期分别为 60、90 d,尿素含量分别为 960、990 g/kg。

本试验采用 3 种土壤做培养试验,分别为鹰潭红壤、封丘潮土、荆门水稻土,其基本理化性质见表 1。

表 1 土壤基本理化性质
Table 1 Physical and chemical properties of tested soils

土壤类型	pH	有机质(g/kg)	砂粒(g/kg)	粉粒(g/kg)	黏粒(g/kg)
鹰潭红壤	4.73	1.68	328	229	442
封丘潮土	8.24	1.52	642	272	86
荆门水稻土	6.09	3.11	74	638	288

1.2 试验方法

1.2.1 土壤培养方法 恒定土壤水分培养 称取包膜尿素约 2 g,与 100 g 风干土均匀混合后,放入底部口径 6.5 cm、高 6 cm、上口口径 8.5 cm 的容器中,加入一定量蒸馏水,调节土壤绝对含水量为 50、100、200、300、400 g/kg,然后置于 25℃ 恒温培养箱中培养。分别在第 7、14、28、56、84 天取样。

干湿交替培养:称取包膜尿素约 2 g,与 100 g 风干土均匀混合后,放入底部口径 6.5 cm、高 6 cm、上口口径 8.5 cm 的容器中;采用称重法加入一定量蒸馏水,调节鹰潭红壤、封丘潮土和荆门水稻土初始含水量为 100% 田间持水量,其对应的绝对含水量分别为 250、280、520 g/kg;然后,将土壤置于 25℃ 恒温培养箱中敞口培养。每隔 6 d 加水至原始重量,一个干湿交替周期为 6 d (第 1、3、5 天 3 种土壤平均含水量分别为 140、40、30 g/kg),干湿交替 9 次,每处理 4 个重复,第 56 天取样。

1.2.2 测定项目及方法 田间持水量采用国际环刀法测定;水势的测定采用张力计法测定;尿素的释放量通过尿素培养前后的质量差计算。

1.3 数据处理

1.3.1 养分释放计算方法 养分释放率=(肥料原重-肥料培养后烘干重量)/(肥料原重×尿素含量)×100%;初期养分释放率=24 h 溶出的尿素量/肥料中尿素总量×100%;累积养分释放率=尿素的累积溶出量/肥料中尿素总量×100%;微分释放率=((n 天溶出的尿素量/肥料中的尿素总量)-初期养分释放率)/(n-1)×100%。

1.3.2 水分参数计算方法 土壤绝对含水量(g/kg)=(原土重-烘干土重)/烘干土重×1 000;土壤相对含水量=土壤含水量/田间持水量×100%。

1.3.3 模型拟合方法 随着时间的推移,包膜尿素在土壤中的微分溶出率基本呈现递减的规律,因此可采用 Sugihara 方程^[29] $N=N_0(1-e^{-kt})$ 进行拟合。式中: N 为 t 时间的释放率(%); N_0 为最大释放率(%); k 为

释放速率常数(d^{-1}); t 为释放期(d)。在方程的拟合中,假定 N_0 为 100%,然后利用实际测得的释放率求出各方方程对应的 k 值,取其平均值即为包膜尿素在该方程中的释放速率常数。因为包膜尿素养分释放率达到 80% 时所需时间即为释放期,所以将 $N=80%$ 代入方程,利用求得的释放速率常数,可求出释放期。

1.3.4 数据统计分析 采用 SPSS 22.0 和 Excel 2013 进行试验数据的统计分析,并用 Duncan 法检验 $P<0.05$ 水平上的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 绝对含水量及干湿交替对两种包膜尿素在土壤中释放的影响

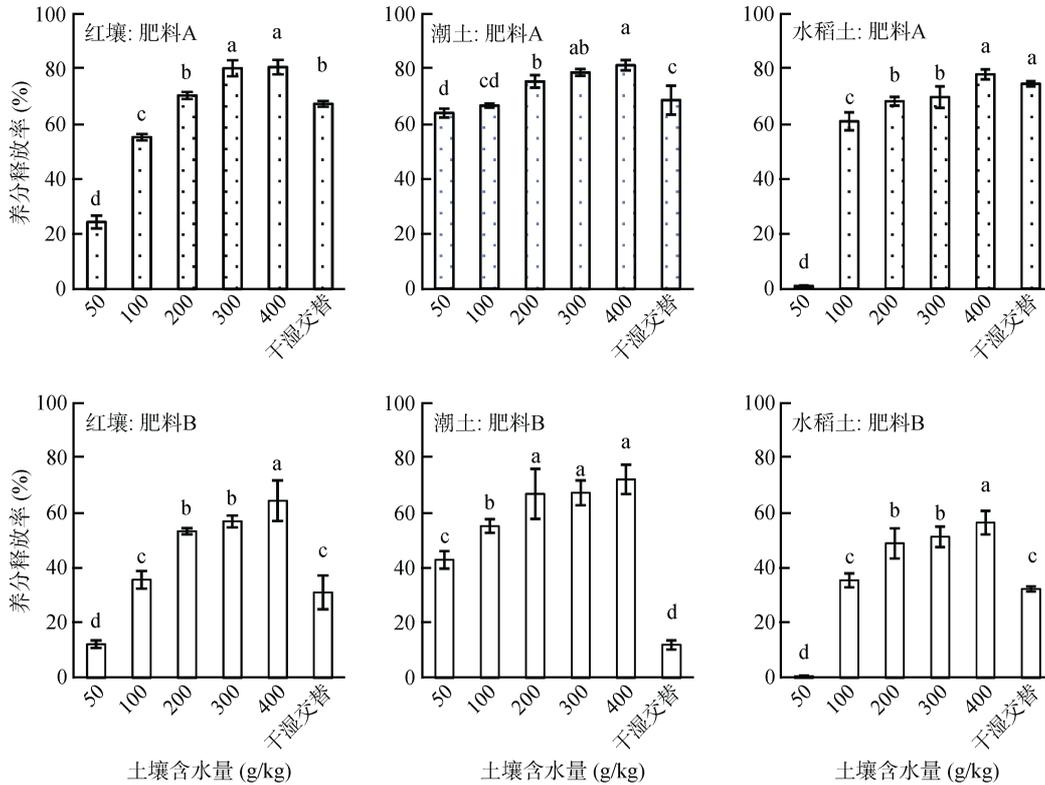
不同绝对含水量和干湿交替处理对两种包膜尿素在 3 种土壤中培养 56 d 释放率的影响如图 1 所示。

在红壤中,对于肥料 A,土壤绝对含水量从 50 g/kg 增加到 300 g/kg 时,包膜尿素养分释放率随土壤含水量的增加而显著增加,绝对含水量为 400 g/kg 时的养分释放率最高;干湿交替条件下的养分释放率接近绝对含水量为 200 g/kg 时的养分释放率。对于肥料 B,土壤绝对含水量从 50 g/kg 增加到 200 g/kg 时,包膜尿素养分释放率随土壤含水量的增加而显著增加;土壤绝对含水量为 400 g/kg 时,养分释放率最大,并与其他处理差异显著;干湿交替条件下的养分释放率接近绝对含水量为 100 g/kg 时的养分释放率。

在潮土中,对于肥料 A,土壤绝对含水量从 50 g/kg 增加到 400 g/kg 时,包膜尿素养分释放率随土壤含水量的增加而增加,绝对含水量为 400 g/kg 时的养分释放率最高;干湿交替条件下的养分释放率接近绝对含水量为 100~200 g/kg 的养分释放率。对于肥料 B,土壤绝对含水量从 50 g/kg 增加到 200 g/kg 时,包膜尿素养分释放率随土壤含水量的增加而显著增加,土壤绝对含水量为 400 g/kg 时养分释放率最大;干湿交替条件下的养分释放率与其他处理差异显著,比绝对含水量为 50 g/kg 时的养分释放率还要低 31%。

在水稻土中，对于肥料 A，土壤绝对含水量从 50 g/kg 增加到 200 g/kg 时，包膜尿素养分释放率随土壤含水量的增加而显著增加，绝对含水量为 400 g/kg 时的养分释放率最高；干湿交替条件下的养分释放率接近绝对含水量为 100 g/kg 时的养分释放率。对

于肥料 B，土壤绝对含水量从 50 g/kg 增加到 200 g/kg 时，包膜尿素养分释放率随土壤含水量的增加而显著增加，土壤绝对含水量为 400 g/kg 时养分释放率最大，并与其他处理差异显著；干湿交替条件下的养分释放率接近绝对含水量为 100 g/kg 时的养分释放率。



(图中不同小写字母代表处理间养分释放率在 $P < 0.05$ 水平差异显著)

图 1 不同水分条件下第 56 天包膜尿素在土壤中的养分释放特征

Fig. 1 Nutrient release rates of coated urea on 56th day under different soil moistures in different soils

2.2 绝对含水量、相对含水量、水势与包膜尿素养分释放率的关系

以肥料 A 第 56 天释放结果为例，在 3 种土壤中研究绝对含水量、相对含水量、水势与包膜尿素在土壤中养分释放率的关系。从图 2 可以看出，当相对含水量在 0% ~ 50% 田间持水量范围内，肥料 A 在红壤中的释放显著低于潮土和水稻土；当相对含水量大于 18% 后，在潮土、水稻土中，包膜尿素养分释放率均随含水量的增加缓慢增加，二者的释放曲线接近重合；当相对含水量大于 100% 后，3 种土壤的释放曲线接近重合。当水势在 0 ~ 60 kPa 时，3 种土壤的释放曲线接近重合；当水势在 60 ~ 100 kPa 范围内时，肥料 A 在红壤中的释放显著低于潮土和水稻土。绝对含水量与包膜尿素在土壤中的养分释放率无明显规律。

参照图 2，将供试 3 种土壤的所有水分处理划分成绝对含水量、相对含水量和水势 3 组，求出不同含

水量指标与包膜尿素养分释放率的关系，如表 2 所示。

由表 2 可知，在 3 种土壤中，绝对含水量对应的相关系数小于相对含水量对应的相关系数，相对含水量对应的相关系数小于水势对应的相关系数，3 种水分参数与释放率的关系式分别为： $y=3 \times 10^{-6}x^3 - 0.0026x^2 + 0.6845x + 14.94$ ， $y=17.002\ln(x) - 0.3001$ ， $y=-0.0002x^3 + 0.0195x^2 - 0.75x + 80.04$ 。

2.3 Sugihara 方程对包膜尿素养分释放率的拟合

以肥料 A 为例，从表 3 可以看出该肥料在红壤、潮土和水稻土中的微分溶出率基本呈现递减的规律。此外，在绝对含水量低于 400 g/kg 时，肥料在潮土中的微分释放率要比红壤和水稻土中都要高。

采用 Sugihara 方程 $N=N_0(1-e^{-kt})$ 对包膜尿素养分释放率进行拟合，计算出养分释放速率常数 k ，然后利用公式计算当 $N=80\%$ 时肥料的释放期 t ，结果如表 4 所示。从表 4 可看出，方程的相关系数 $r > 0.95$ ，拟合方程较接近实际释放特性。本研究每种土壤有 5

个不同水分处理，将这 3 种土壤共 15 个处理分成绝对含水量、相对含水量和水势 3 组，根据表 4 求出不同水分指标与释放期的关系如表 5。

从表 5 可知，绝对含水量对应的相关系数小于相

对含水量对应的相关系数，相对含水量对应的相关系数小于水势对应的相关系数，3 种水分参数与释放期的关系式分别为： $y=115.7e^{-0.001x}$ ， $y=269.1x^{-0.295}$ ， $y=64.79e^{0.0066x}$ 。

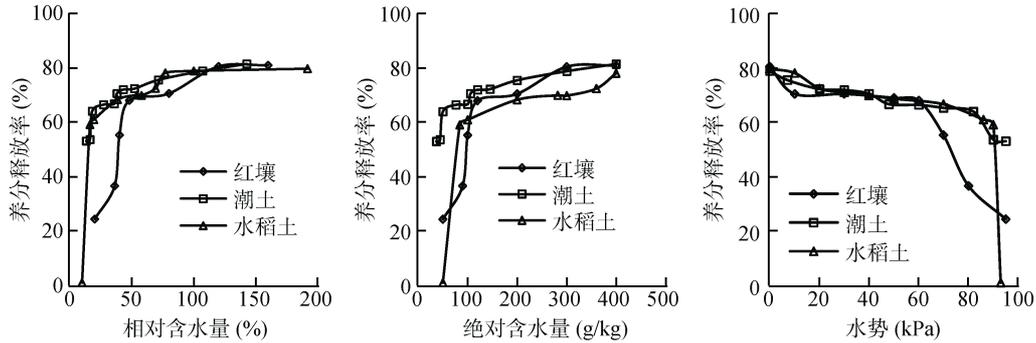


图 2 3 种土壤中不同水分参数下包膜尿素养分释放

Fig. 2 Nutrient release rates of coated urea under different soil moisture parameters in three soils

表 2 水分参数与包膜尿素养分释放率的关系

Table 2 Relations of water parameters and Nutrient release rates of coated urea

水分指标	关系式	相关系数 <i>r</i>
绝对含水量(g/kg)	$y=3\times 10^{-6}x^3-0.0026x^2+0.6845x+14.94$	0.73
相对含水量(%)	$y=17\ln(x)-0.3001$	0.75
水势(kPa)	$y=-0.0002x^3+0.0195x^2-0.75x+80.04$	0.80

注：其中 *x* 是水分指标，*y* 为释放率(%)。

表 3 包膜尿素的微分释放率

Table 3 Daily average release rates of coated urea in different soils under different soil moistures

土壤类型	绝对含水量(g/kg)	释放时间(d)				
		7	14	28	56	84
红壤	50	0.7 a	0.6 a	0.5 b	0.4 b	0.3 c
	100	1.6 a	1.1 b	1.1 b	1.0 b	0.8 c
	200	2.0 a	1.6 b	1.5 b	1.3 c	0.9 d
	300	2.1 a	1.7 bc	1.9 b	1.5 c	1.1 d
	400	2.8 a	1.9 b	2.0 b	1.5 d	1.1 c
潮土	50	2.1 a	1.2 bc	1.5 b	1.2 c	0.8 d
	100	2.2 a	1.9 ab	1.7 b	1.2 c	1.0 c
	200	2.3 a	1.9 b	1.7 c	1.4 d	1.0 e
	300	2.4 a	2.0 b	2.0 b	1.4 c	1.1 d
	400	2.8 a	2.1 b	2.1 b	1.5 c	1.1 d
水稻土	50	0.1 a	0.0 b	0.0 cd	0.0 d	0.0 bc
	100	1.2 a	1.2 a	1.1 a	1.1 a	0.9 b
	200	1.5 ab	1.3 bc	1.6 a	1.2 c	0.9 d
	300	1.7 a	1.5 b	1.8 a	1.3 c	1.0 d
	400	2.0 a	2.0 a	2.1 a	1.4 b	1.1 c

注：同行不同小写字母表示不同时间包膜尿素养分微分释放率之间存在显著差异($P < 0.05$)。

表 4 Sugihara 方程对包膜尿素养分释放率的拟合参数
Table 4 Equation parameters of Sugihara to the nutrient release characteristics of coated urea

土壤类型	绝对含水量 (g/kg)	相对含水量 (%)	水势 (kPa)	Sugihara 方程			
				$k(d^{-1})$	相关系数	标准差	释放期(d)
红壤	50	20	95	0.005 2	0.952 2	2	308
	100	40	72	0.013 2	0.993 9	2	122
	200	80	10	0.018 6	0.990 8	3	86
	300	120	0	0.023 4	0.990 1	4	69
	400	160	0	0.026 0	0.992 7	3	62
潮土	50	18	82	0.016 3	0.975 0	5	98
	100	36	48	0.020 1	0.997 5	2	80
	200	71	7	0.022 7	0.998 1	2	71
	300	107	0	0.025 3	0.995 6	2	64
	400	143	0	0.028 6	0.997 0	2	56
水稻土	50	10	93	0.000 3	0.960 9	0	4 900
	100	19	86	0.013 5	0.990 9	3	119
	200	38	60	0.017 0	0.987 2	4	95
	300	58	44	0.019 0	0.983 8	4	85
	400	77	10	0.024 6	0.989 2	4	65

表 5 3 种水分参数与包膜尿素释放期的关系
Table 5 Regression of soil moisture parameters and release duration of coated urea

水分指标	关系式	相关系数 r
绝对含水量(g/kg)	$y=115.7e^{-0.001x}$	0.61
相对含水量(%)	$y=269.1x^{-0.295}$	0.85
水势(kPa)	$y=64.79e^{0.0066x}$	0.91

注：其中 x 是水分指标， y 为释放期(d)。

3 讨论

在本研究条件下，3 种土壤中，土壤绝对含水量从 50 g/kg 增加到 400 g/kg 时，包膜尿素养分释放率均随土壤含水量的增加而增加，其中土壤绝对含水量从 50 g/kg 增到 200 g/kg 时，包膜尿素养分释放率基本均随土壤含水量的增加而显著增加，这与施卫省等^[22]的结果较一致。此时水分因素对包膜尿素养分释放的影响掩盖了土壤类型因素和肥料种类因素对包膜尿素养分释放的影响，是控制包膜尿素养分释放的主要因素。土壤绝对含水量从 200 g/kg 增加到 400 g/kg 时，包膜尿素养分释放率因土壤类型和肥料种类而异，此时水分因素对包膜尿素养分释放的影响不能掩盖土壤类型因素和肥料种类因素对包膜尿素养分释放的影响，而是与土壤类型因素、肥料种类因素共同作用。

3 种土壤中，土壤绝对含水量从 50 g/kg 增加到 400 g/kg 时，肥料 A 的养分释放率均明显高于肥料 B，这与母永龙等^[21]的结果不一致，可能因为供试肥料

的包膜材料不同的缘故。

在干湿交替条件下两种肥料释放率的差异变大，肥料 B 在潮土中的释放率与其他两种土壤的差异也变大，这可能由于肥料 A 释放期短，水分更容易进入的缘故。肖庆礼等^[30]研究结果表明，黏土夹层不仅对水分入渗起到显著的阻碍作用，而且具有较强的持水保水能力。本研究中综合两种肥料，从整体来看，干湿交替条件下潮土养分释放率小于红壤小于水稻土，这正是由于潮土是砂质土，粉粒和黏粒含量少，保水性差，在干湿交替过程中失去的水分最快，同样培养周期中，土壤干燥程度相对其他两种土壤较强，因而释放率最低。

对于肥料 A，当相对含水量大于 18% 时，在潮土和水稻土中，土壤类型对包膜尿素养分的释放基本上没有影响。在 3 种土壤中，当相对含水量大于 100% 时，土壤水分和土壤类型对包膜尿素养分的释放都没有显著影响。水势接近 100 kPa 时，包膜尿素养分释放率急剧下降，荆门水稻土 93 kPa 的处理第 56 天养分释放率为 1%，接近 100 kPa 时包膜尿素养分释放率极低，这将肖剑等^[23]得出的包膜型控释肥料的养分完全不能释放的水势范围进一步缩小。有研究表明，作为土壤团聚体胶结物质的黏粒是影响水分入渗性能的重要因素，入渗性能与黏粒含量显著负相关，而与粉(砂)粒显著正相关^[31-32]。本研究中当相对含水量在 0%~50% 田间持水量范围内，或水势在 60~100 kPa 时，供试肥料在红壤中的释放显著低于潮土和水

稻土,这正是由于红壤中黏粒含量高,入渗性能差,在低含水量条件下肥料周围土体的水分得不到即时补给,因而释放率最低。

本研究利用 Sugihara 方程对包膜尿素养分释放率的拟合相关系数 $r > 0.95$,拟合方程较接近实际释放特性。3 种不同土壤水分参数中,水势较绝对含水量和相对含水量与包膜尿素释放期的关系更加密切,其中水势与释放期的相关系数为 0.91,在一定范围内可用水势来表征土壤含水量与包膜尿素释放期的关系,这与郑圣先等^[26]的研究结果较一致。

4 结论

本研究发现,当土壤绝对含水量较低时(从 50 g/kg 增到 200 g/kg),水分因素是控制包膜尿素养分释放的主要因素。而在干湿交替条件下,不同肥料间释放率的差异变大。当相对含水量在 0%~50% 田间持水量范围内,或水势在 60~100 kPa 范围内时,肥料的释放速率与土壤黏粒含量有关;当相对含水量大于 100% 田间持水量时,或水势低于 60 kPa 时,土壤水分和土壤类型对包膜尿素养分释放的影响基本不再显著。Sugihara 方程可以较好地拟合包膜尿素在试验设定水分条件下的养分释放特性,相关系数 $r > 0.95$ 。土壤绝对含水量、相对含水量和水势均可以用来预测包膜尿素的释放率和释放期,其中水势(x)与包膜尿素释放期(y)的拟合效果最好,关系式为 $y=64.79e^{0.0066x}$, $r=0.91$ 。

参考文献:

- [1] Smith L E D, Siciliano G. A comprehensive review of constraints to improved management of fertilizers in China and mitigation of diffuse water pollution from agriculture[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2015, 209: 15–25
- [2] 赵伟,梁斌,周建斌. 施入 ^{15}N 标记氮肥在长期不同培肥土壤的残留及其利用[J]. *土壤学报*, 2015, 52(3): 587–596
- [3] Vaneeckhaute C, Ghekiere G, Michels E, et al. Assessing nutrient use efficiency and environmental pressure of macronutrients in biobased mineral fertilizers: A review of recent advances and best practices at field scale[J]. *Advances in Agronomy*, 2014, 128: 137–180
- [4] 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*, 2012, 19(2): 259–273
- [5] 赵冬,颜廷梅,乔俊,等. 稻季田面水不同形态氮素变化及氮肥减量研究[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(4): 743–749
- [6] Acquaye S, Inubushi K. Comparative effects of application of coated and non-coated urea in clayey and sandy paddy soil microcosms examined by the ^{15}N tracer technique: I. Effects on growth, N uptake, and yield of rice crop[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2004, 50(2): 205–213
- [7] 王艳华,邱现奎,胡国庆,等. 控释肥对坡地农田地表径流氮磷流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(2): 10–14
- [8] Azam F, Benckiser G, Müller C, et al. Release, movement and recovery of 3, 4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP), ammonium, and nitrate from stabilized nitrogen fertilizer granules in a silty clay soil under laboratory conditions[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2001, 34(2): 118–125
- [9] Serna M D, Banuls J, Quinones A, et al. Evaluation of 3, 4-dimethylpyrazole phosphate as a nitrification inhibitor in a Citrus-cultivated soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 32(1): 41–46
- [10] 谭德水,江丽华,张骞,等. 南四湖过水区不同施肥模式下农田养分径流特征的初步研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(2): 464–471
- [11] Barros R, Isidoro D, Aragón R. Irrigation management, nitrogen fertilization and nitrogen losses in the return flows of La Violada irrigation district (Spain)[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2012, 155: 161–171
- [12] Ye Y, Liang X, Chen Y, et al. Alternate wetting and drying irrigation and controlled-release nitrogen fertilizer in late-season rice. Effects on dry matter accumulation, yield, water and nitrogen use[J]. *Field Crops Research*, 2013, 144: 212–224
- [13] 梁钢,梁林洲,董晓英,等. 控释肥料在华北潮土小麦-玉米轮作体系中的施肥效应[J]. *土壤*, 2016, 48(1): 1–6
- [14] 许秀成,李萍,王好斌. 包裹型缓释/控制释放肥料专题报告[J]. *磷肥与复肥*, 2000(3): 1–6
- [15] 王恩飞,莫海涛,崔智多,等. 天然木粉在包裹控释尿素上的应用[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(12): 264–268
- [16] 崔文慧,宋丽芬,刘惠军,等. 在设施农业条件下缓释肥养分释放与土壤水分状况之间的关系[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(31): 1522–1522
- [17] 杨斌华,郭桂珍,孙友谊,等. 细菌微生物对高分子缓释化肥降解性能的影响[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(9): 5278–5280
- [18] 李长洲,张民,杨越超. 新型大球包膜控释复合肥养分释放特征及影响因素[J]. *化肥工业*, 2013, 40(6): 7–10
- [19] 刘憻倩,徐绍辉,李晓鹏,等. 土体构型对土壤水氮储运的影响研究进展[J]. *土壤*, 2016, 48(2): 219–224
- [20] 王素萍,李小坤,鲁剑巍,等. 控释尿素在水及不同类型土壤中的养分释放特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(3): 636–641
- [21] 毋永龙,杜建军,王益权,等. 不同土壤环境因素对复合改性矿物包膜尿素氮素释放的影响[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2007, 35(6): 179–184
- [22] 施卫省,罗小林,陈志远. 土壤水分对水冬瓜果油包膜尿素养分释放性的研究[J]. *中国农学通报*, 2013, 29(11): 111–114
- [23] 肖剑,郑圣先,易国英. 控释肥料养分释放动力学及其机理研究(第 3 报): 土壤水分对包膜型控释肥料养分释放的影响(续完)[J]. *磷肥与复肥*, 2002, 17(6): 9–12

- [24] Kochba M, Gambash S, Avnimelech Y. Studies on slow release fertilizers: 1. Effects of temperature, soil moisture, and water vapor pressure[J]. *Soil Science*, 1990, 149(6): 339-343
- [25] 彭廷柏. 湘北红壤低丘岗地农业持续发展研究[M]. 北京: 科学出版社, 1995
- [26] 郑圣先, 肖剑, 易国英. 旱地土壤条件下包膜控释肥料养分释放的试验与数学模拟[J]. *磷肥与复肥*, 2006, 21(2): 16-21
- [27] 肖强, 隗公臣, 吕东, 等. 微水溶性胶结包膜肥料氮素释放速率与预测[J]. *干旱地区农业研究*, 2016(1): 108-113
- [28] 王苓, 张民, 刘之广, 等. 土壤水吸力对控释尿素养分释放特征的影响[J]. *土壤学报*, 2017, 54(2): 1-11
- [29] 陈延华, 孙焱鑫, 薛高峰, 等. 基于 Sugihara 模型的树脂包衣控释肥在土壤中释放规律的研究[J]. *土壤通报*, 2011, 42(3): 637-641
- [30] 肖庆礼, 黄明斌, 邵明安, 等. 黑河中游绿洲不同质地土壤水分的入渗与再分布[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(2): 124-131
- [31] 胡阳, 邓艳, 蒋忠诚, 等. 岩溶坡地不同植被类型土壤水分入渗特征及其影响因素[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(3): 597-604
- [32] 杨宁, 邹冬生, 付美云, 等. 紫色土丘陵坡地恢复中土壤团聚体特征及其与土壤性质的关系[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(9): 2361-2368

Effects of Soil Moisture on Nutrient Release from Coated Urea in Soils

GAO Shuaishuai^{1,2}, WANG Huoyan^{1*}, ZHOU Jianmin¹, ZHAO Xinlin^{1,2},
LIU Xiaowei^{1,2}, CHEN Zhaoming^{1,2}

(1 *Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;*
2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: A soil incubation experiment was conducted to study the effects of soil moisture indexes including the absolute water content, alternation of wetting and drying, relative soil water content and soil water potential on nutrient release characteristics of two kinds of coated urea in three kinds of soils. The release durations of the two kinds of tested fertilizers were 60 days and 90 days, referred to as fertilizer A and fertilizer B, respectively. The results showed that nutrient release rate of coated urea increased significantly when the soil absolute water content increased from 50 g/kg to 200 g/kg, and the soil moisture was the main influential factor of nutrient release of coated urea. Under dry-wet alternate condition, the differences of the release rates between two fertilizers became greater, the release rate of the coated urea B was much lower in alluvial soil than that in the other soils. When the relative water content increased from 0% to 50% or soil water potential within the scope of 60 kPa to 100 kPa, the release rate of the coated urea was much higher in krasnozem than those in the other soils which is associated with high clay content in krasnozem. When the relative water content surpassed 100% or soil water potential was below 60 kPa, the effects of soil moisture and soil type became slight on nutrient release of coated urea. The frequently-used Sugihara equation could well describe the nutrient release characteristics of coated urea under soil moisture conditions designed in the experiment, and $r > 0.95$. All of the three soil moisture indexes can be used to predict nutrient release rate and duration of the coated urea, but the best fitting effect was occurred between water potential (x) and duration (y), the relation is $y = 64.79e^{0.0066x}$ ($r=0.91$).

Key words: Nutrient release; Coated urea; Moisture; Alternation of wetting and drying Fitting