

模拟施肥对赤水河上游地区土壤氮磷钾养分释放的影响

刘浩楠^{1, 2}, 杨娟^{1, 2*}, 焦蒙³

(1. 云南省高原湿地保护修复与生态服务重点实验室, 西南林业大学生态与环境学院, 云南 昆明 650224; 2. 国家高原湿地研究中心, 西南林业大学生态与环境学院, 云南 昆明 650224; 3. 西南林业大学水土保持学院, 云南 昆明 650224)

摘要: 探究不同氮磷钾肥配施对土壤氮素、磷素、钾素释放的影响, 为赤水河上游地区坡耕地农田土壤养分的高效利用和持续供应提供理论指导依据。以配方施肥为基础, 赤水河流域坡耕地土壤为研究对象, 通过室内模拟试验, 设置对照 (CK)、磷钾 (PK)、氮钾 (NK)、氮磷 (NP) 和氮磷钾配施 (NPK) 5 个处理, 研究各处理下土壤碱解氮、硝态氮、铵态氮, 有效磷、速效钾在 90 d 内的释放规律以及对释放量的影响。结果表明: 5 个处理下, 土壤碱解氮、硝态氮、有效磷、速效钾的释放量表现为先增加后稳定的趋势, 铵态氮的释放量表现为先降低后稳定的趋势; 与 CK 和缺素处理相比, NPK 配施处理可以显著提高土壤碱解氮、硝态氮、铵态氮、有效磷、速效钾的释放速率和释放量。因此, 配施氮磷钾肥不仅能促进土壤养分的释放, 还能维持和提高土壤养分含量。

关键词: 氮磷钾; 土壤养分; 释放动态规律

自 1978 年我国农村改革以来, 农业发展取得了显著成就, 但同时也伴随着土壤酸化板结、硝酸盐污染、水体富营养化以及养分淋溶流失污染地下水等生态环境问题^[1-4]。这些问题的根源在于化肥的过度及不合理施用, 给农业生态环境造成巨大压力。据《中国农业绿色发展报告 2023》的数据显示, 2022 年中国农用化肥的施用总量达到 5079.2 万 t (折纯)^[5]。为此, 新方案提出了到 2025 年, 要使氮、磷、钾等养分结构更加合理, 并努力实现全国农用化肥施用量减少的目标^[6]。这一目标的提出, 不仅是对农业可持续发展的迫切要求, 也是对生态环境保护责任的积极响应。鉴于此, 迫切 need 要加强土壤养分管理和肥料高效利用的相关研究, 以应对农业生态环境所面临的挑战。

赤水河是长江上游南岸最重要的一级支流, 其特殊的地理环境为动植物提供了良好的生存空间, 在生态环境保护方面具有十分重要的意义^[7-8]。已

有研究表明, 赤水河流域面临生态系统破碎、生态补偿机制不合理、工业项目和传统农业发展对环境威胁大等挑战^[9-10]。尤其在农业生产过程中, 仅凭借传统的施肥经验, 通常只注重单一营养元素的施用, 忽视了氮磷钾养分均衡配施后所发挥的积极作用。这种施肥方式不仅降低了肥料的利用效率, 还导致土壤中未被作物吸收的剩余养分随雨水的冲刷进入河流, 直接威胁当地用水安全并造成环境污染。先前关于肥料的研究主要集中在有机肥和化肥配施对氮素的影响^[11-12]、作物对养分的吸收利用以及改善品质等方面^[13-16]。迄今为止, 关于赤水河流域不同氮磷钾肥配施对土壤养分释放动态规律及释放量影响的研究报道仍然较为少见。因此, 本研究以配方施肥为基础, 选取赤水河流域坡耕地农田土壤为研究对象, 开展了室内模拟试验, 设置对照 (CK)、磷钾 (PK)、氮钾 (NK)、氮磷 (NP) 和氮磷钾配施 (NPK) 5 个处理, 旨在探究不同氮磷钾肥配施对土壤氮素、磷素、钾素释放动态规律及其释放量的影响, 为赤水河上游地区坡耕地农田土壤养分的高效利用和持续供应提供理论指导依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地位于云南省昭通市镇雄县雨河镇龙井村 (27° 45' 18" N, 104° 51' 40" E), 该地区属

收稿日期: 2024-09-18; 录用日期: 2024-12-07

基金项目: 云南省科技厅重点研发计划项目 (202203AC100001); 国家自然科学基金资助项目 (22166033); 云南省应用基础研究计划面上项目 (202101AT070046); 云南省农业联合面上项目 (202101BD070001-112)。

作者简介: 刘浩楠 (2000-), 硕士研究生, 研究方向为土壤养分管理。E-mail: 13888956991@163.com。

通讯作者: 杨娟, E-mail: phdyangjuan@foxmail.com。



于温带季风气候,年平均气温 12℃,年平均降水量 900 mm,降水主要集中在 6—8 月,年无霜期约 225 d,土壤类型为黄壤,用地类型为坡耕地,坡度为 10°,坡向 E97°,海拔 1390 m,主要种植农作物有玉米、油菜。土壤基本理化性质见表 1。

表 1 室内培养土壤基本理化性质

全氮 (g/kg)	全磷 (g/kg)	全钾 (g/kg)	硝态氮 (mg/kg)	铵态氮 (mg/kg)	碱解氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	pH
0.14	0.94	3.11	10.59	1.10	155.20	40.20	61.49	6.4

1.2 试验设计

试验于 2023 年 5 月 5 日至 8 月 5 日进行,土壤样品采集于云南省昭通市镇雄县龙井村,采取深度为 0 ~ 20 cm 的耕作层土壤,风干后过 2 mm 筛,除去土壤中的动植物残体、根系和小石块等。培养的 5 个处理分别为:空白(CK)、磷钾(PK)、氮钾(NK)、氮磷(NP)、氮磷钾(NPK),每个处理 18 个重复,合计 90 盆。施肥量计算方法:施肥量(g/kg)=肥料(kg/hm²)×1/(10000 m²耕层土重)×1000^[17];每公顷耕层土重为 2621310 kg,各处理具体施肥量见表 2。分别称 300 g 风干土均匀平铺于 500 mL 培养瓶底部,将肥料混合稀释于 5 mL 的超纯水中,均匀喷入培养瓶中,调节土壤含水率达到田间持水量的 50%,用黑色塑料膜包裹后用可透气封口膜封口,最后放入恒温培养箱标准条件下(20℃)培养。培养过程中,每隔 4 d 采取称重补水法添加超纯水以使土壤含水量保持不变,在每个培养时间点(0、10、20、30、40、50、60、70、80、90 d)均重复采集 3 次土壤样品用于土壤铵态氮、硝态氮、碱解氮、有效磷、速效钾的测定。

表 2 室内培养土壤肥料施用配比量

处理	N		P ₂ O ₅		K ₂ O	
	(g/kg)	(g/hm ²)	(g/kg)	(g/hm ²)	(g/kg)	(g/hm ²)
CK	0	0	0	0	0	0
PK	0	0	0.143	60	0.055	75
NP	0.148	180	0	0	0.055	75
NK	0.148	180	0.143	60	0	0
NPK	0.148	180	0.143	60	0.055	75

1.3 测定项目与方法

全氮含量采用半微量凯氏定氮法测定;全磷、全钾含量采用等离子体发射光谱法测定;碱解氮含量采用碱解扩散法测定;有效磷含量采用钼锑比色法测定;速效钾含量采用火焰光度法测定;铵态

氮含量采用靛酚蓝比色法测定;硝态氮含量采用紫外分光光度法测定;pH 采用 pH 计测定(水土比 2.5:1)。

1.4 数据处理与分析

试验数据均采用 Excel 2016 进行基础数据处理,利用 SPSS 26.0 进行描述性统计分析,以评估每个参数的平均值和标准差,单因素方差分析(ANOVA)检验显著性,利用 Origin 2021 绘图。

2 结果与分析

根据不同处理下养分随时间的变化情况,利用 SPSS 26.0 对时间和浓度之间的关系进行拟合,得到碱解氮、硝态氮、铵态氮、有效磷、速效钾与时间之间的拟合特征。浓度与时间的散点图通过线性、对数、二次项、立方、复合、幂等函数方程拟合,拟合方程中 R² 最大为最优拟合曲线。碱解氮、有效磷、速效钾浓度与时间的最优拟合为线性函数,硝态氮、铵态氮的浓度与时间的最优拟合为指数函数。

2.1 氮磷钾肥配施对土壤氮素释放动态规律的影响

土壤碱解氮浓度随着培养时间的增加呈上升趋势(图 1)。碱解氮的释放过程符合直线方程 y=kx+b,其中 y 是土壤碱解氮的释放量,x 是天数(d),k 是养分的释放速率(d⁻¹),b 是常数^[18]。通过比较碱解氮的线性方程可知,CK、PK、NP、NK、NPK 处理的平均释放速率分别为 0.3811、0.4282、0.5069、0.5351、0.5874 mg/(kg·d⁻¹),碱解氮的释放速率表现为 NPK>NK>NP>PK>CK。可见,施氮处理提高了碱解氮的释放速率,且 NPK 处理的释放速率高于 NK、NP 处理,可为植物提供更加长久的效果。随着培养时间的持续,土壤碱解氮的含量呈上升趋势,且不同处理间动态变化趋势相似,在第 90 d 仍处于增加状态,土壤碱解氮

的含量表现为 $\text{NPK} > \text{NP} > \text{NK} > \text{PK} > \text{CK}$ 。与 CK 处理相比, PK 处理土壤碱解氮含量平均提高了 5.60%, NK 处理土壤碱解氮含量提高了 21.49%, NP 处理土壤碱解氮含量提高了 23.21%, NPK 处理土壤碱解氮含量提高了 28.52%, NPK 处理土壤碱解氮增加量最大, NP 处理次之, PK 最低。可见, 配施氮肥为土壤补充了氮源, NPK 处理的释放量和释放速率高于 NK、NP 处理, NPK 处理可提供更加高效、长久的养分供应, 减少施用后的氮肥流失。

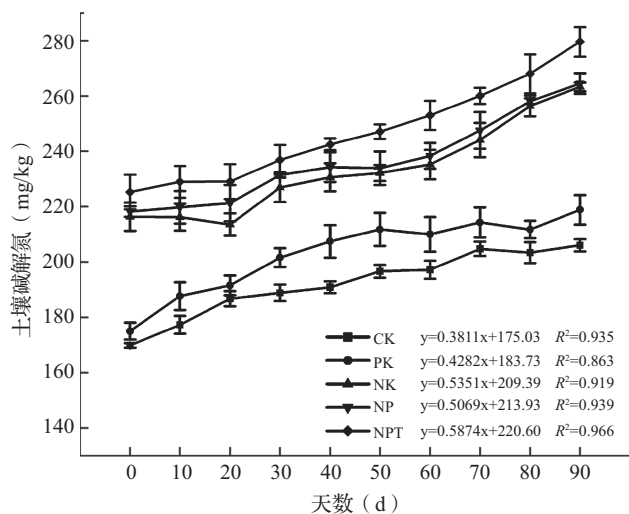


图1 不同氮磷钾配比土壤碱解氮释放浓度的动态变化曲线

土壤硝态氮浓度随着培养时间的增加呈现先上升后平稳的趋势 (图 2)。硝态氮的释放过程符合拟一阶动力学方程 $y = a(1 - e^{-bx})$, a 是方程常数, b 是养分释放速率常数。通过比较硝态氮的拟合方程可知, CK、PK、NK、NP、NPK 处理的平均释放率常数分别为 0.036、0.039、0.043、0.044、0.045 d^{-1} , 硝态氮的释放速率表现为 $\text{NPK} > \text{NP} > \text{NK} > \text{PK} > \text{CK}$ 。随着培养时间的持续, 土壤硝态氮的含量呈现先上升后平稳的变化趋势, 且不同处理间动态变化趋势相似, 在 0 ~ 40 d 时, CK、PK 处理处于增加状态, 40 d 后平稳释放; 在 0 ~ 60 d 时, NK、NP 处理处于增加状态, 60 d 后平稳释放; 在 0 ~ 70 d 时, NPK 处理处于持续增加状态, 70 d 后平稳释放。施氮处理延长了土壤硝态氮释放时间, 可为植物提供更加长久的效果。当 70 d 后所有处理硝态氮释放稳定后, CK 处理土壤硝态氮含量平均提高了 2.8 倍, PK 处理土壤硝态氮含量平均提高了 2.8 倍, NK 处理土壤硝态氮含量

提高了 2.9 倍, NP 处理土壤硝态氮含量提高了 3.0 倍, NPK 处理土壤硝态氮含量提高了 3.2 倍。可见, 施氮处理提高了硝态氮的释放量, 且 NPK 处理土壤硝态氮含量显著高于 NK、NP 处理, 硝态氮释放量的增加提高了氮素利用率, 可为植物提供更多的硝态氮供给。

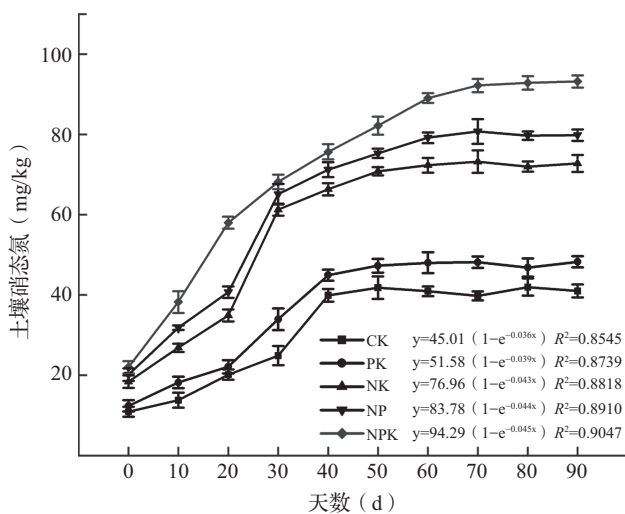


图2 不同氮磷钾配比土壤硝态氮释放浓度的动态变化曲线

土壤铵态氮浓度随着培养时间的增加呈现先降低后平稳的趋势 (图 3)。铵态氮的释放过程符合衰减指数拟合方程 $y = ae^{-bx}$ 。其中, y 是铵态氮释放量, x 是天数, a 是衰减方程常数, b 是养分释放速率常数^[19]。通过比较铵态氮的衰减指数拟合方程可知, CK、PK、NK、NP、NPK 处理的平均释放速率常数分别为 0.020、0.023、0.039、0.040、0.041 d^{-1} , 土壤铵态氮的释放速率表现为 $\text{NPK} > \text{NP} > \text{NK} > \text{PK} > \text{CK}$ 。添加氮肥加快了土壤铵态氮的释放速率, 土壤铵态氮的释放过程均表现为直接释放, 0 ~ 40 d 期间, CK、PK 处理铵态氮的释放量分别为 9.96、13.15 mg/kg, 释放过程表现为缓慢释放, NK、NP 处理释放量分别为 62.07、74.52 mg/kg、表现为快速释放, NPK 处理释放量为 61.56 mg/kg。40 d 后, CK、PK 处理到达养分释放平衡阶段, 40 ~ 70 d 时, NK、NP 处理继续释放, 70 d 后释放稳定, 而 NPK 处理仍在释放且于 90 d 时趋于平稳。可见, 施用氮肥加快了铵态氮释放速率, NPK 处理铵态氮释放速率常数高于 NK、NP 处理, 延长了释放时间, 促进养分被作物吸收利用, 从而提高氮肥利用率, 满足作物生长更长久的养分需求。

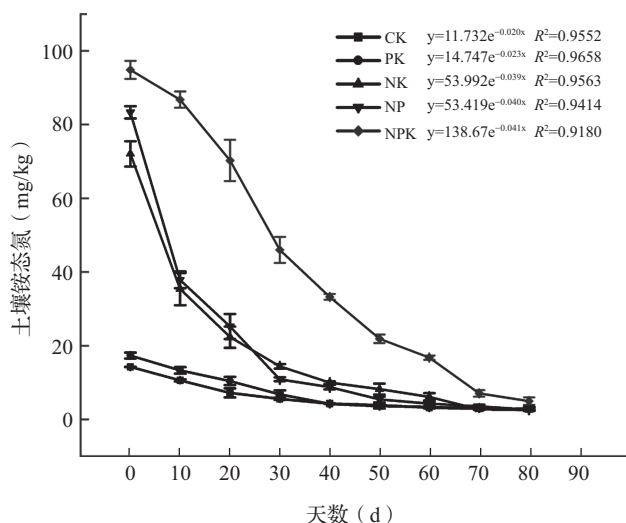


图3 不同氮磷钾配比土壤铵态氮释放浓度的动态变化曲线

2.2 氮磷钾肥配施对土壤磷素释放动态规律的影响

土壤有效磷浓度随着培养时间的增加呈现上升趋势 (图4)。有效磷的释放过程符合直线方程 $y=kx+b$, 其中 y 是土壤有效磷的释放量, x 是天数 (d), k 是养分的释放速率 (d^{-1}), b 是常数。通过比较有效磷的线性方程可知, CK、NK、NP、PK、NPK 处理的平均释放率分别为 0.1293、0.1605、0.4711、0.4832、0.5006 $mg/(kg \cdot d^{-1})$, 有效磷的释放速率表现为 $NPK>PK>NP>NK>CK$ 。可见, 施磷处理提高了有效磷的释放速率, NPK 处理的释放速率高于 PK、NP 处理, 满足了作物生长更长久的养分需求。随着培养时间的持续, 土壤有效磷的含量呈现上升趋势, 且不同处理间动态变化趋势相似, 在第 90 d 时仍处于增加状态, 土壤有效

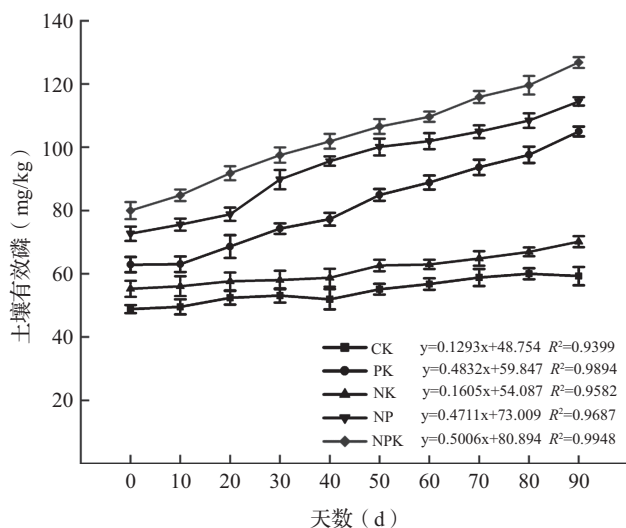


图4 不同氮磷钾配比土壤有效磷释放浓度的动态变化曲线

磷的含量表现为 $NPK>NP>PK>NK>CK$ 。与 CK 处理相比, NK 处理土壤有效磷含量提高了 12.32%, PK 处理土壤有效磷含量提高了 48.50%, NP 处理土壤有效磷含量提高了 71.81%, NPK 处理土壤有效磷含量提高了 88.64%, NPK 处理土壤有效磷的增加量最大, NP 处理次之, NK 最低。配施磷肥为土壤补充了磷素, NPK 处理有效磷释放量和释放速率高于 PK、NP 处理, NPK 处理可提供更加高效、长久的养分供应, 减少施用后的磷肥流失。

2.3 氮磷钾肥配施对土壤钾素释放动态规律的影响

土壤速效钾浓度随着培养时间的增加呈现上升趋势 (图5)。速效钾的释放过程符合直线方程 $y=kx+b$, 其中 y 是土壤速效钾的释放量, x 是天数 (d), k 是养分的释放速率 (d^{-1}), b 是常数。通过比较速效钾的线性方程可知, CK、PK、NK、NP、NPK 处理的平均释放率分别为 0.2117、0.294、0.3074、0.1540、0.3196 $mg/(kg \cdot d^{-1})$, 速效钾的释放速率表现为 $NPK>NK>PK>CK>NP$ 。可见, 施钾处理提高了速效钾的释放速率, 且 NPK 处理的释放速率高于 PK、NK 处理, 可为植物提供更加持久的效果。随着培养时间的持续, 土壤速效钾的含量呈现上升趋势, 且不同处理间动态变化趋势相似, 在第 90 d 时仍处于增加状态, 且土壤速效钾的含量表现为 $NPK>NK>PK>NP>CK$ 。与 CK 处理相比, 在 0 ~ 90 d 内, PK 处理土壤速效钾含量提高了 32.45%, NK 处理土壤速效钾含量提高了 34.98%, NP 处理土壤速效钾含量提高了 20.08%, NPK 处理土壤速效钾含量

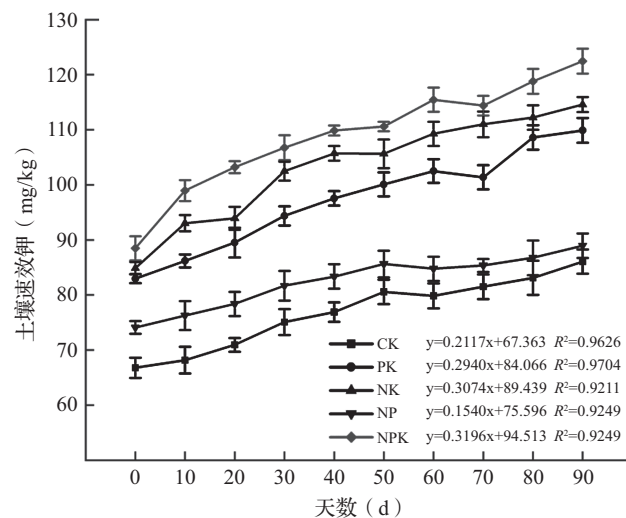


图5 不同氮磷钾配比土壤速效钾释放浓度的动态变化曲线

提高了 38.39%，NPK 处理土壤速效钾增加量最大，NK 处理次之，NP 最低。配施钾肥为土壤补充了钾素，NPK 处理的速效钾释放量和释放速率高于 PK、NK 处理，从而提高钾肥利用率，减少了钾肥流失。

2.4 不同氮磷钾配比对氮、磷、钾释放量的影响

由表 3 可知，不同氮磷钾配比对土壤氮、磷、钾的释放量产生了显著性影响 ($P<0.05$)。在氮素释放方面，与 CK 相比，NPK 配施能够显著增加土壤中碱解氮、硝态氮的释放量，NP 和 NK 处理则次之，PK 和 CK 处理的释放量显著低于 NPK、NP 和 NK 处理。NPK 处理显著增加了土壤中铵态氮的释放量，NK 和 NP 处理的释放量虽然高于 PK 和

CK 处理，但都没有 NPK 配施所产生的影响显著。这说明缺乏某一种营养元素都会影响到铵态氮的释放量。在磷素释放方面，NPK 和 NP 处理下有效磷的释放量显著高于其他处理，NK 和 CK 处理未产生显著影响，而 PK 处理的释放量则显著低于 NPK 和 NP，高于 NK 和 CK 处理。表明磷素的施用对有效磷的释放量具有重要影响，而氮素的施用也在一定程度上促进了有效磷的释放。在钾素释放方面，NPK 处理下速效钾的释放量显著高于其他处理，表明缺乏某一种营养元素都会影响到速效钾的释放量。综上所述，氮磷钾肥配施显著提高了土壤中氮素、磷素、钾素的释放量，能够为作物的生长提供更充足持久的养分。

表 3 不同氮磷钾配比对碱解氮、硝态氮、铵态氮、有效磷、速效钾释放量的影响 (mg/kg)

处理	碱解氮	硝态氮	铵态氮	有效磷	速效钾
CK	192.18 ± 11.93b	31.52 ± 12.66b	5.66 ± 3.97b	54.57 ± 4.04c	76.89 ± 6.53c
NPK	247.03 ± 18.09a	71.16 ± 24.81a	38.44 ± 34.54a	103.42 ± 15.20a	108.89 ± 10.06a
PK	203.00 ± 13.96b	37.03 ± 14.26b	6.71 ± 5.23b	81.59 ± 14.71b	97.30 ± 9.04b
NK	233.47 ± 16.90a	56.90 ± 21.49a	17.57 ± 21.81b	61.31 ± 4.97c	103.27 ± 9.70ab
NP	236.74 ± 15.84a	62.38 ± 22.76a	18.37 ± 25.59b	94.21 ± 14.49a	82.52 ± 4.85c

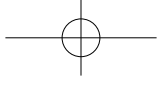
注：数值后不同小写字母表示处理间差异达显著水平 ($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 氮磷钾肥配施对土壤养分释放动态的影响

氮磷钾是体现土壤肥力的重要指标，同时也是影响作物生长发育的主要因素。土壤速效氮含量反映了氮的供给状况，包括硝态氮、铵态氮两种最容易被作物吸收利用的氮素形态。本研究发现，不同碱解氮磷钾配比对碱解氮、铵态氮、硝态氮的影响呈现显著差异。在培养过程中土壤碱解氮含量持续增加，铵态氮含量逐渐下降，硝态氮含量逐渐上升，最后趋于稳定。这与前人的研究结果一致^[20]，进一步验证了土壤中氮素的转化。化肥的施用加速了氮素的释放，同时，在土壤硝化作用的影响下，铵态氮转化为硝态氮，而土壤带负电荷，硝态氮不能被土壤胶体吸附，最后导致硝态氮含量上升。因此，土壤中碱解氮的持续供给受到硝态氮和铵态氮动态平衡的影响。通透性好的土壤有利于磷的吸收，但紧实度高，孔隙少的土壤以及低温等环境均不利于磷素的释放^[21]。本研究发现，不同氮磷钾配比下土壤有效磷的释放规律呈现一致的变化趋势，0 ~ 90 d 内均表现为增长趋势。有效磷含量

并未出现降低趋势，可能受到培养时间不充分的影响，后续可继续延长培养时间，获得更加准确的土壤养分释放规律。相较于缺磷处理，添加磷素明显增加了土壤中有效磷的释放量，其中，氮磷钾配施对土壤有效磷含量增加的贡献最为明显，这与先前的研究结果一致^[22]。有研究表明，施用氮肥能够激发磷素的释放^[23]。本研究结果也表明施用氮素能促进磷素的释放，进一步证实了养分间的相互促进作用可以提高土壤中磷素的释放量。此外，磷素的释放规律与作物的生长发育有显著关系，崔力拓等^[24]研究发现，磷的释放规律受到农作物生长发育的影响。在农业生产中，应根据不同作物生长过程的差异，选择合适的施肥量或进行间种套作，可以减少磷素的迁移流失，提高利用率。钾素通常以阳离子的形式存在于土壤中，具有正电荷，与带有负电荷的土壤胶体黏粒和有机质相互吸附，能够减缓钾的流失，有助于被植物吸收利用。本研究中不同氮磷钾配施下土壤速效钾的释放规律与磷一致，均表现为增长趋势，这与现有的研究结果一致^[25-26]。这可能是因为 NPK 肥的配合施用，使得钾素迅速分解和矿化，导致土壤中速效钾含量迅速上升，从而



降低钾流失的风险。土壤钾素的变化还受到气候因素、土质、地貌类型、土壤 pH 等一系列因素的影响^[27]。由此可见,土壤养分释放动态规律不仅受到养分本身的影响,而且还受到外界各种环境因素的调控。

3.2 氮磷钾肥配施对土壤养分释放量的影响

氮磷钾肥配合施用显著提高土壤中氮、磷、钾养分的释放量,表明氮磷钾之间存在相互协同作用。研究发现,施用氮磷钾肥能够改善土壤结构,增强土壤的保水保肥能力,有助于减少养分的流失,提高土壤养分含量^[28-30]。此外,氮磷钾肥进入到土壤后会产生一系列化学反应和形态转化,还能为土壤微生物提供充足的营养物质,提高微生物活性,加速肥料的矿化,促进氮、磷、钾养分的释放^[31-32]。因此,在实际农业生产活动中,不仅要考虑单一元素的补充,还应注重氮磷钾元素的配合施用,以充分发挥它们之间的协同作用,提高肥料的整体效果,这对于指导科学施肥具有重要意义。此外,鉴于本研究是在室内培养条件下进行,未受到外界环境(温度、水分等)、作物生长、气候因素(降水)等条件的影响。未来研究应在田间试验中进一步探究 NPK 配施下氮素、磷素、钾素的释放动态以及 NPK 配施对作物品质和产量的影响。

4 结论

室内模拟试验得出,在 5 个施肥处理下,赤水河流域农田土壤碱解氮、硝态氮、有效磷、速效钾的释放量在 90 d 内表现为先增加后稳定的趋势,铵态氮的释放量表现为先降低后稳定的趋势;相较于 CK、NP、NK 和 PK 处理,在 NPK 配施条件下,碱解氮、铵态氮、硝态氮、有效磷、速效钾的释放速率和释放量最高,可见,平衡施肥不仅促进土壤养分的释放,还能维持和提高土壤养分含量。本研究为赤水河上游地区农业生产提供了科学的施肥指导理论基础,有助于推动该地区农业向更加高效、环保、可持续发展的方向。

参考文献:

- [1] 纵海英. 农业可持续发展中的土壤肥料问题与对策[J]. 新农民, 2024 (9): 60-62.
- [2] 李婷, 吴海波. 施用化肥对农业生态环境的影响及对策[J]. 智慧农业导刊, 2022, 2 (19): 46-48.
- [3] 陶小龙, 徐磊, 夏磊, 等. 农业面源污染中农田氮污染对水

体的危害及防治措施[J]. 农业灾害研究, 2022, 12 (6): 161-163.

- [4] Yahaya S M, Mahmud A A, Abdullahi M, et al. Recent advances in the chemistry of nitrogen phosphorus and potassium as fertilizers in soil: a review [J]. *Pedosphere*, 2023, 33 (3): 385-406.
- [5] 李丽颖. 我国农业绿色发展水平稳步提升 [N]. 农民日报, 2024-09-03 (007).
- [6] 农业农村部. 关于印发《到 2025 年化肥减量化行动方案》和《到 2025 年化学农药减量化行动方案》的通知 [J]. 中华人民共和国农业农村部公报, 2022 (12): 11-19.
- [7] 陈妍, 翟俊, 杨旻, 等. 赤水河流域生态状况与变化特征综合评估[J]. *环境工程*, 2023, 41 (4): 185-194.
- [8] 张文贵, 王建余, 邓艳, 等. 赤水河流域(镇雄段)生态环境保护工作中种植结构调整措施分析[J]. *低碳世界*, 2022, 12 (2): 193-195.
- [9] 冉景丞, 蒙文萍. 贵州赤水河流域生态保护策略探讨[J]. *贵州林业科技*, 2018, 46 (1): 54-60.
- [10] 王金林, 武广云, 刘友林, 等. 云南省化肥施用现状及减量增效的途径研究[J]. *中国农学通报*, 2018, 34 (3): 26-36.
- [11] 段鹏鹏, 丛耀辉, 徐文静, 等. 氮肥与有机肥配施对设施土壤可溶性氮动态变化的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48 (23): 4717-4727.
- [12] 方胜志, 高佳蕊, 王虹桥, 等. 氮肥与有机肥配施对设施土壤净矿化氮动态变化的影响[J]. *土壤通报*, 2021, 52 (5): 1173-1181.
- [13] 方娅婷, 任涛, 张顺涛, 等. 氮磷钾肥对旱地和水田油菜产量及养分利用的影响差异[J]. *作物学报*, 2023, 49 (3): 772-783.
- [14] 范晓晖, 陈慕松, 刘文婷, 等. 化肥减量配施有机肥对葡萄产量、品质及土壤质量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2022 (3): 46-51.
- [15] Ren T, Lu J W, Li H, et al. Potassium-fertilizer management in winter oilseed-rape production in China [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2013, 176 (3): 429-440.
- [16] 陈曦, 白倩倩, 史桂清, 等. 氮磷钾配施对超高产夏玉米养分吸收和产量性状的影响[J]. *中国农学通报*, 2019, 35 (10): 7-14.
- [17] 艾尼瓦尔·吾买尔. 盆栽条件下氮、磷、钾肥对加工番茄生长、养分吸收及分配的影响[D]. 塔里木: 塔里木大学, 2019.
- [18] 于红. “浸提法”探讨包膜肥料养分释放动力学及释放期快速推测方法[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009.
- [19] 李昌明, 王晓玥, 孙波. 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[J]. *土壤学报*, 2017, 54 (5): 1206-1217.
- [20] 唐拴虎, 陈建生, 徐培智, 等. 控释肥料氮素释放与水稻吸收动态研究[J]. *土壤通报*, 2004, 35 (2): 186-190.
- [21] 关春林, 周怀平, 解文艳, 等. 长期施肥对褐土土壤磷素累积及层间分布的影响[J]. *山西农业科学*, 2009, 37 (3):

64-67.

[22] 张富林, 吴茂前, 夏颖, 等. 江汉平原稻田田面水氮磷变化特征研究[J]. 土壤学报, 2019, 56 (5): 1190-1200.

[23] 叶玉适, 梁新强, 李亮, 等. 不同水肥管理对太湖流域稻田磷素径流和渗漏损失的影响[J]. 环境科学学报, 2015, 35 (4): 1125-1135.

[24] 崔力拓, 李志伟. 缓坡耕地土壤磷素释放的动态规律研究[J]. 土壤通报, 2007, 38 (4): 697-700.

[25] 崔帅, 张迪迪, 刘烁然, 等. 不同钾肥对风沙土钾素动态变化及玉米生长的影响[J]. 玉米科学, 2020, 28 (1): 160-164, 171.

[26] 张水清, 黄绍敏, 聂胜委, 等. 长期定位施肥对夏玉米钾素吸收及土壤钾素动态变化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20 (1): 56-63.

[27] 刘海虹. 温度和 pH 对土壤中氮磷释放量影响的试验研究[J]. 能源环境保护, 2019, 33 (4): 25-27, 36.

[28] 杨金翰, 田小明, 胡晨阳, 等. 氮肥配施调理剂对土壤团聚体和有机碳及苜蓿产量的影响[J]. 草地学报, 2025, 33 (1): 147-156.

[29] 李健. 磷肥施用对旱地土壤氮素转化及水分运移的影响[D]. 西安: 西安理工大学, 2024.

[30] 刘淑军, 李冬初, 黄晶, 等. 水稻油菜轮作下稻草还田和钾肥对土壤团聚体及钾素分布的影响[J]. 中国农业科学, 2022, 55 (23): 4651-4663.

[31] 冯冰聪, 马杰, 刘勇, 等. 氮素在农田土壤中迁移转化的研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2025, 42 (2): 277-287.

[32] 郜永博, 王世显, 魏珉, 等. 氮磷钾用量对基质培茄子产量、根系形态和根际微生物数量与酶活性的影响[J]. 中国农业科学, 2021, 54 (21): 4623-4634.

Effects of simulated fertilization on soil nitrogen, phosphorus and potassium nutrient release in the upper Chishui River area

LIU Hao-nan^{1, 2}, YANG Juan^{1, 2*}, JIAO Meng³ (1. Yunnan Key Laboratory of Plateau Wetland Conservation, Restoration and Ecological Services, College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming Yunnan 650224; 2. National Plateau Wetland Research Center, College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming Yunnan 650224; 3. College of Soil and Water Conservation, Southwest Forestry University, Kunming Yunnan 650224)

Abstract: The effects of different nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer formulations on the release of soil nitrogen, phosphorus and potassium were investigate, in order to provide a theoretical guidance basis for the efficient utilization and sustainable supply of soil nutrients in sloping arable soils in the upper reaches of the Chishui River. Based on the formula fertilization, the soil of sloping arable land in Chishui River Basin was taken as the research object, and five treatments, namely, control (CK), phosphorus-potassium (PK), nitrogen-potassium (NK), nitrogen-phosphorus (NP) and nitrogen-phosphorus-potassium (NPK), were set up in indoor simulation tests to study the release patterns of soil available nitrogen, nitrate nitrogen, ammonium nitrogen, available phosphorus and available potassium and the effects on the release amounts in 90 days under the various treatments. The results showed that the release of soil available nitrogen, nitrate nitrogen, available phosphorus and available potassium under the five treatments showed a tendency of increasing and then stabilizing, and the release of ammonium nitrogen showed a tendency of decreasing and then stabilizing. Compared with the CK and the deficiency treatments, the application of NPK fertilizers could significantly increase the release rate and the release content of soil available nitrogen, nitrate nitrogen, ammonium nitrogen, available phosphorus and available potassium. Therefore, the application of NPK fertilizers could not only promote the release of soil nutrients, but also maintain and improve the soil nutrient content.

Key words: nitrogen, phosphorus and potassium; soil nutrients; release dynamic pattern