



# 土壤酶谱分析指示腐解微食物网特征

邢稳<sup>1,2#</sup>、胡宁<sup>1#</sup>、李忠芳<sup>1</sup>、冯良山<sup>3</sup>、张伟东<sup>4</sup>、Gerhard Du Preez<sup>5</sup>、张慧敏<sup>6</sup>、李冬初<sup>6</sup>、鲁顺保<sup>7</sup>、张小川<sup>8</sup>、  
张晴雯<sup>2\*</sup>、姜翼来<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> 贺州学院

<sup>2</sup> 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所

<sup>3</sup> 辽宁省农业科学院

<sup>4</sup> 中国科学院沈阳应用生态研究所

<sup>5</sup> 南非西北大学

<sup>6</sup> 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所

<sup>7</sup> 江西农业大学

<sup>8</sup> 加拿大阿尔伯塔大学



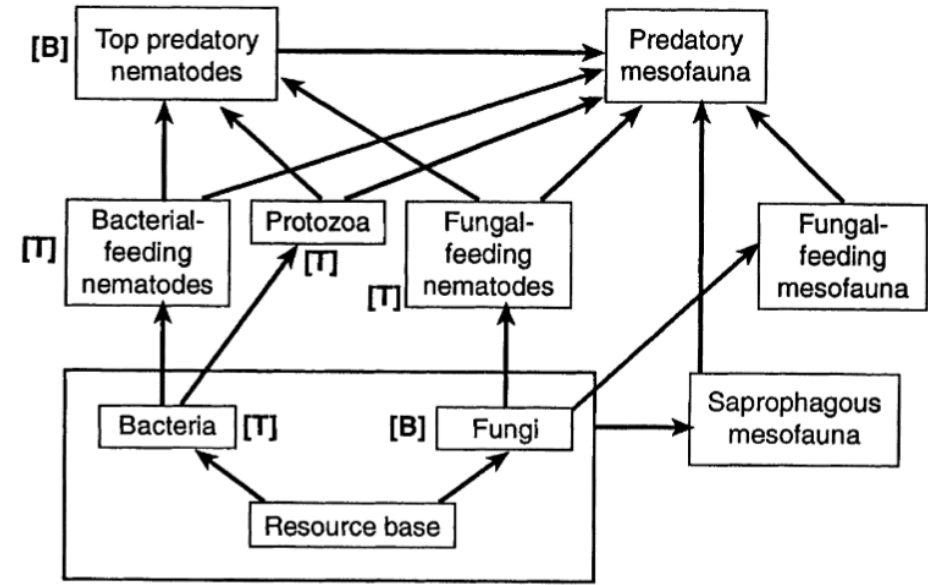
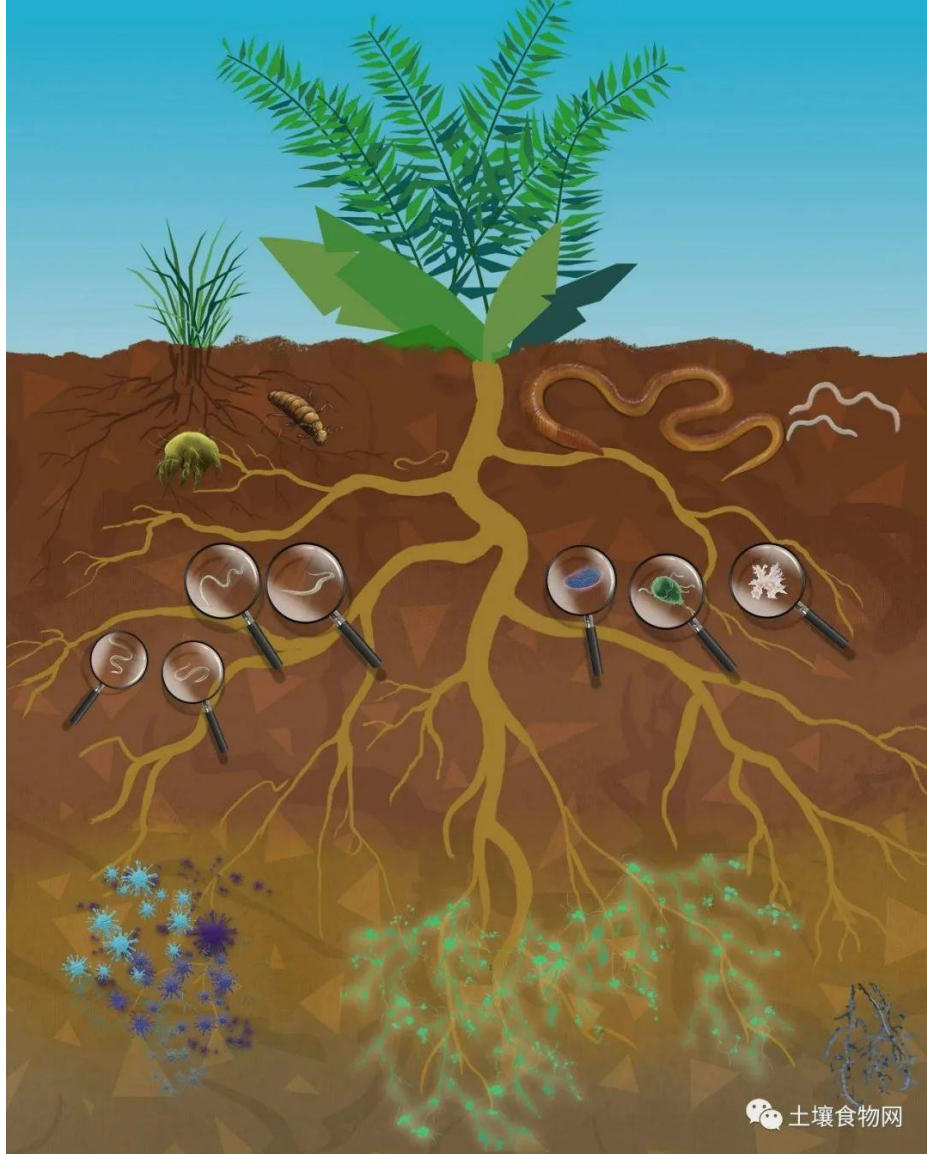
Xing, Wen, Ning Hu, Zhongfang Li, Liangshan Feng, Weidong Zhang, Gerhard Du Preez, Huimin Zhang, et al. 2023.  
“Soil Enzyme Profile Analysis for Indicating Decomposer Micro-Food Web.” *iMeta* e161.

<https://doi.org/10.1002/imt2.161>



# 研究背景

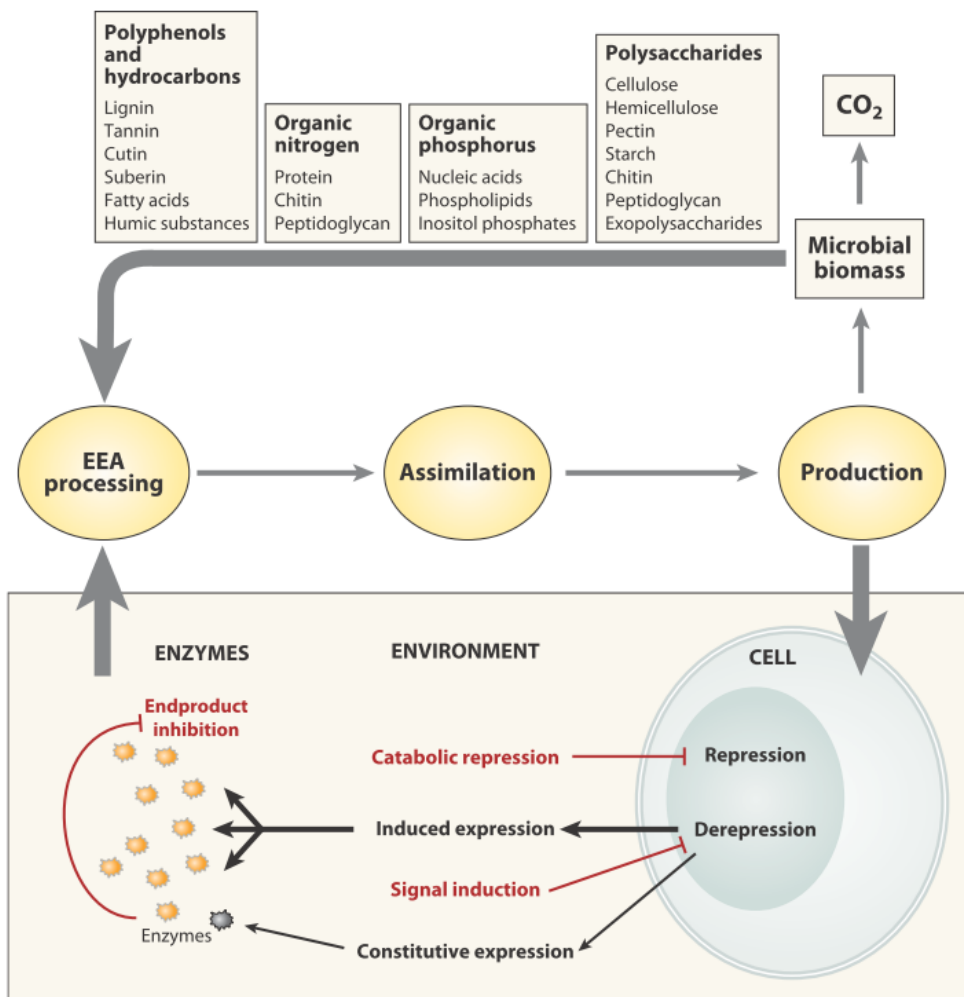
## 1) 土壤微食物网



Wardle *et al.*, 1998

- 由地下“微生物-原生动物-线虫”构成的土壤微食物网，在支撑生态系统功能和提供生态系统服务等方面发挥着关键作用。

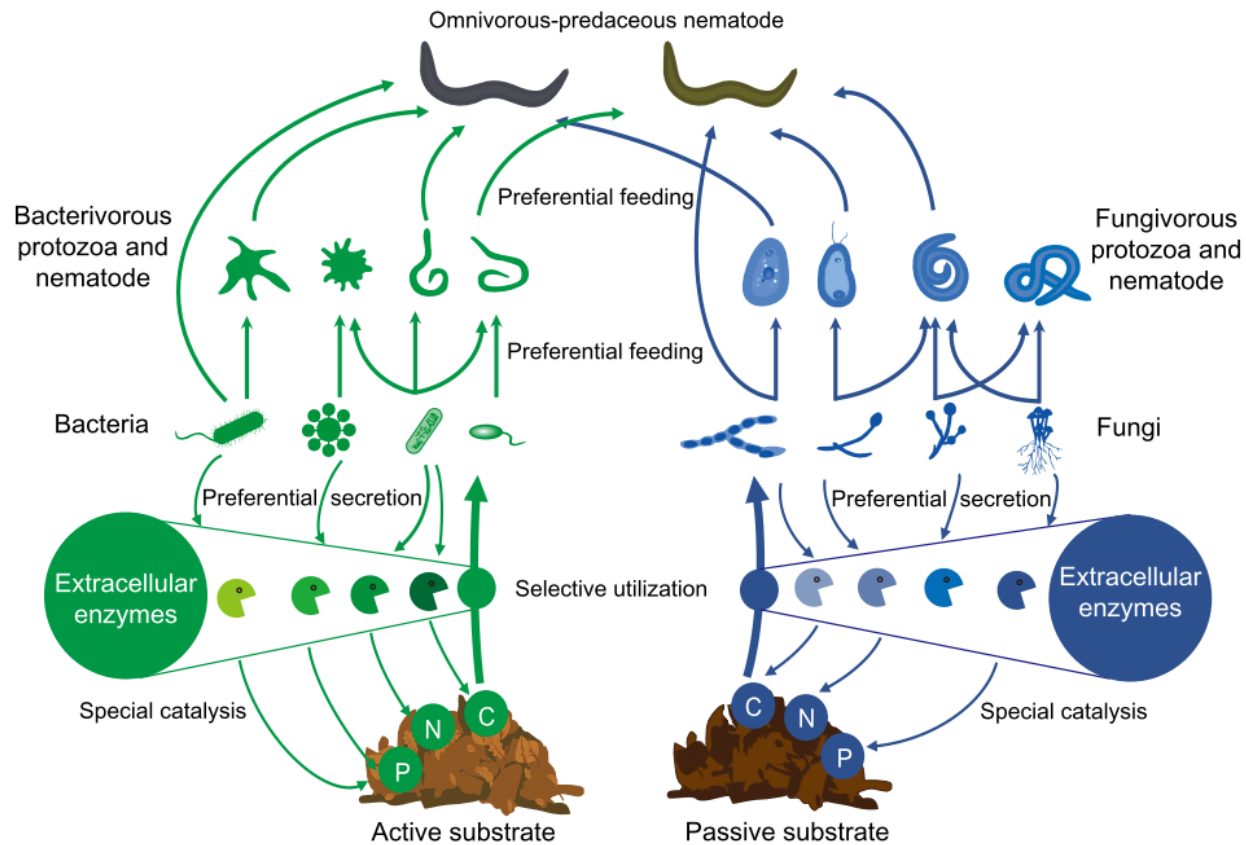
## 2) 土壤胞外酶及其与土壤微食物网的联系



- 微生物胞外酶催化分解的限速步骤并调节了土壤微食物网中的能量流动。



## 2) 土壤胞外酶及其与土壤微食物网的联系



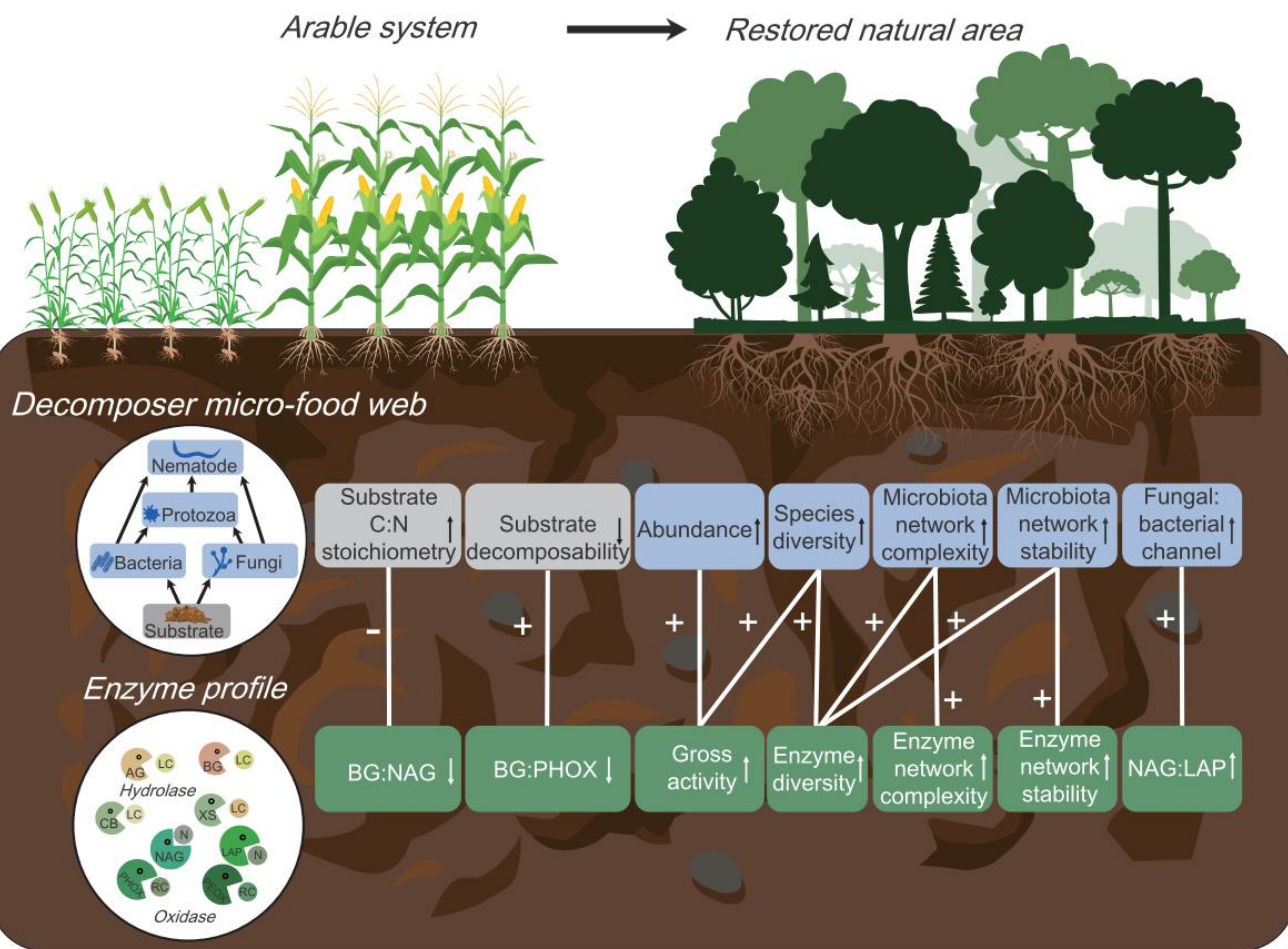
1) 胞外酶的催化反应具有**底物特异性**。

2) 微生物的胞外酶生产具有**身份专一性**。

3) **微型动物**的种类组成也可能会间接改变微生物胞外酶的生产模式。

土壤微食物网的经典结构与微生物胞外酶的机制联系。

## 3) 研究目的



- 目前还缺乏能够提供微食物网综合信息的生态指标。
- 我们通过一项基于耕地系统转化为自然区域的案例研究，首次提出了一种土壤胞外酶谱分析方法。
- 该方法有望成为微食物网特征的综合衡量指标，并能够预测土壤微食物网的状态。



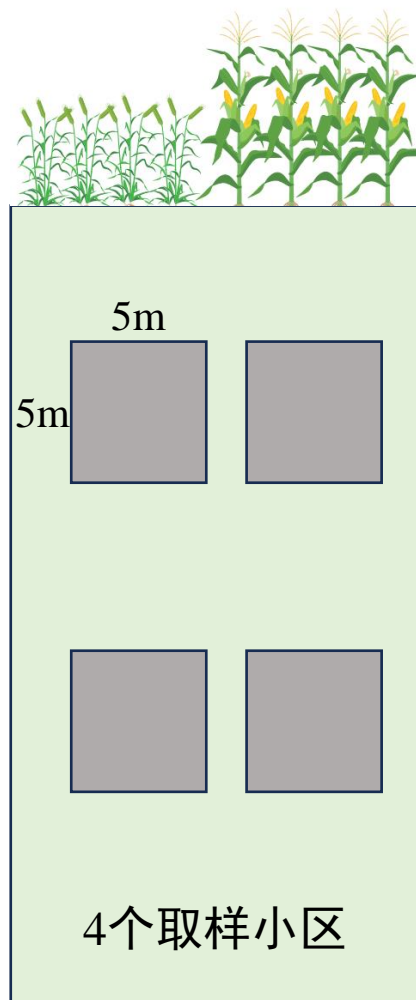
# 研究背景

## 本研究提出8种酶谱指数，用于指示微食物网的特征

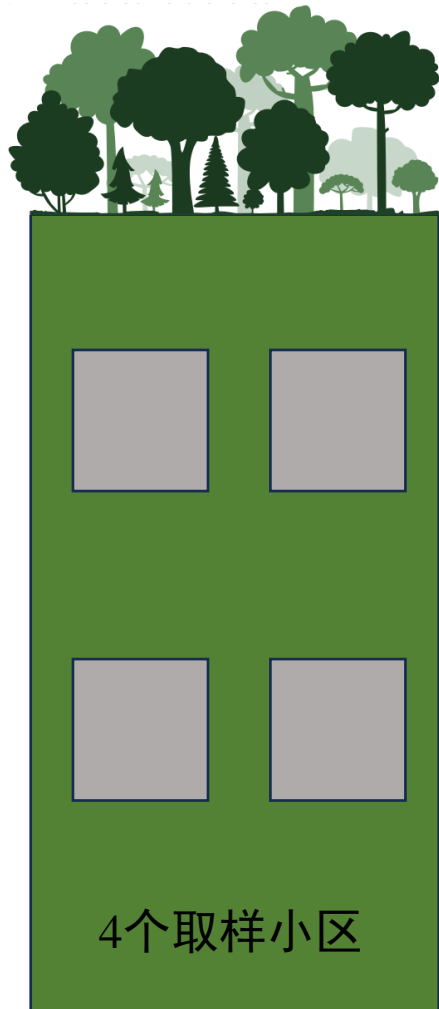
酶谱指数	计算	对微食物网特征的指示意义
(1) 酶化学计量比	获取不同养分的酶活性比值	将底物化学计量学和养分限制联系起来
(2) 基于酶活性的碳可分解性	碳水解酶与氧化酶的比值	指示了底物的可分解性
(3) 基于酶活性的通道指数	真菌衍生的酶活性与细菌衍生的酶活性比值	反映了真菌能流通道相比于细菌能流通道的优势
(4) 组成	基于Bray-Curtis 相异性矩阵进行主坐标分析后，第一主坐标的得分	与土壤微食物网中的生物群落组成有关联
(5) 总活性	标准化后的所有酶活性的均值	更高的总酶活性指示了更高的底物数量和更高的土壤生物多度
(6) 多样性	Alpha多样性，对于选择的测定酶群落，包括了酶的丰富度、香浓指数和Pielou均匀度等	更高的酶多样性指示了土壤生物群落更高的多样性和均匀度，以及生物群落网络更高的复杂性和稳定性
(7) 网络复杂性	由共现网络分析得到的复杂性指数(如平均度、平均聚类系数等)	酶网络的复杂性指数越高，生物群落网络的复杂性越高
(8) 网络稳定性	由共现网络分析得到的稳定性指数(如鲁棒性和脆弱性等)	酶网络的鲁棒性较高而脆弱性较低，说明生物群落网络的稳定性较高



# 实验设计与方法



农田系统



自然恢复系统

研究样点：湖南祁阳国家土壤质量观测实验站

取样时间：2021年6月和9月

取样深度：0-15cm

## ➤ 实验处理

- 农田系统
- 自然恢复系统



## • 测定指标

- (1) 土壤底物：总有机碳氮、高锰酸钾氧化碳、溶解性碳氮
- (2) 土壤细菌和真菌群落
- (3) 土壤原生动物群落
- (4) 土壤线虫群落
- (5) 土壤胞外酶活性：与土壤碳氮循环相关的8种酶

## • 酶谱指数

- (1) 酶化学计量比
- (2) 碳可分解性
- (3) 通道指数
- (4) 组成
- (5) 总活性
- (6) 多样性
- (7) 网络复杂性
- (8) 网络稳定性

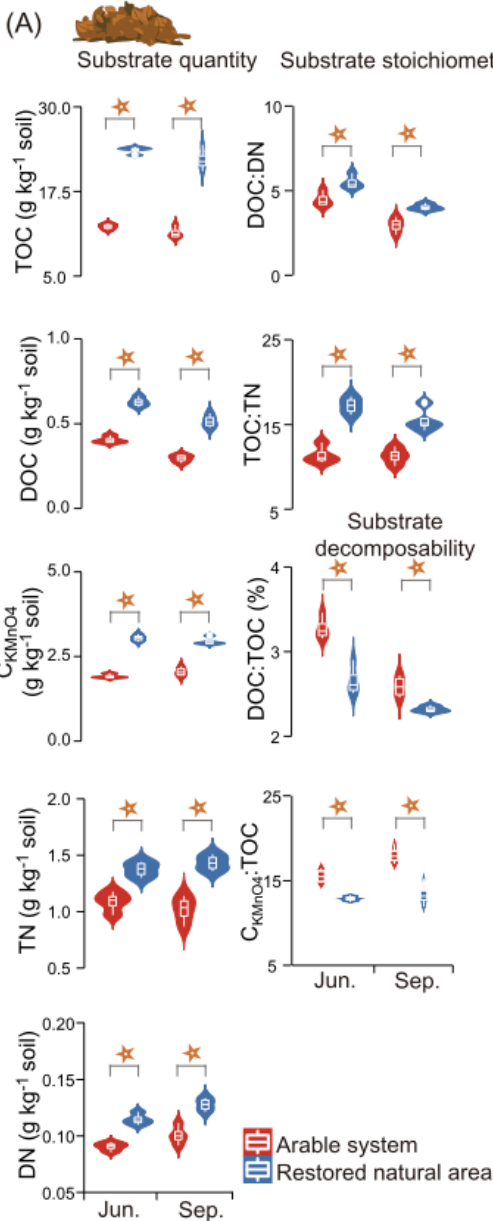
## • 微食物网特征

- (1) 底物数量、质量和可分解性
- (2) 土壤生物以及总体食物网生物的组成、丰度、多样性和分解通道指数
- (3) 土壤生物以及总体食物网生物网络的复杂性和稳定性

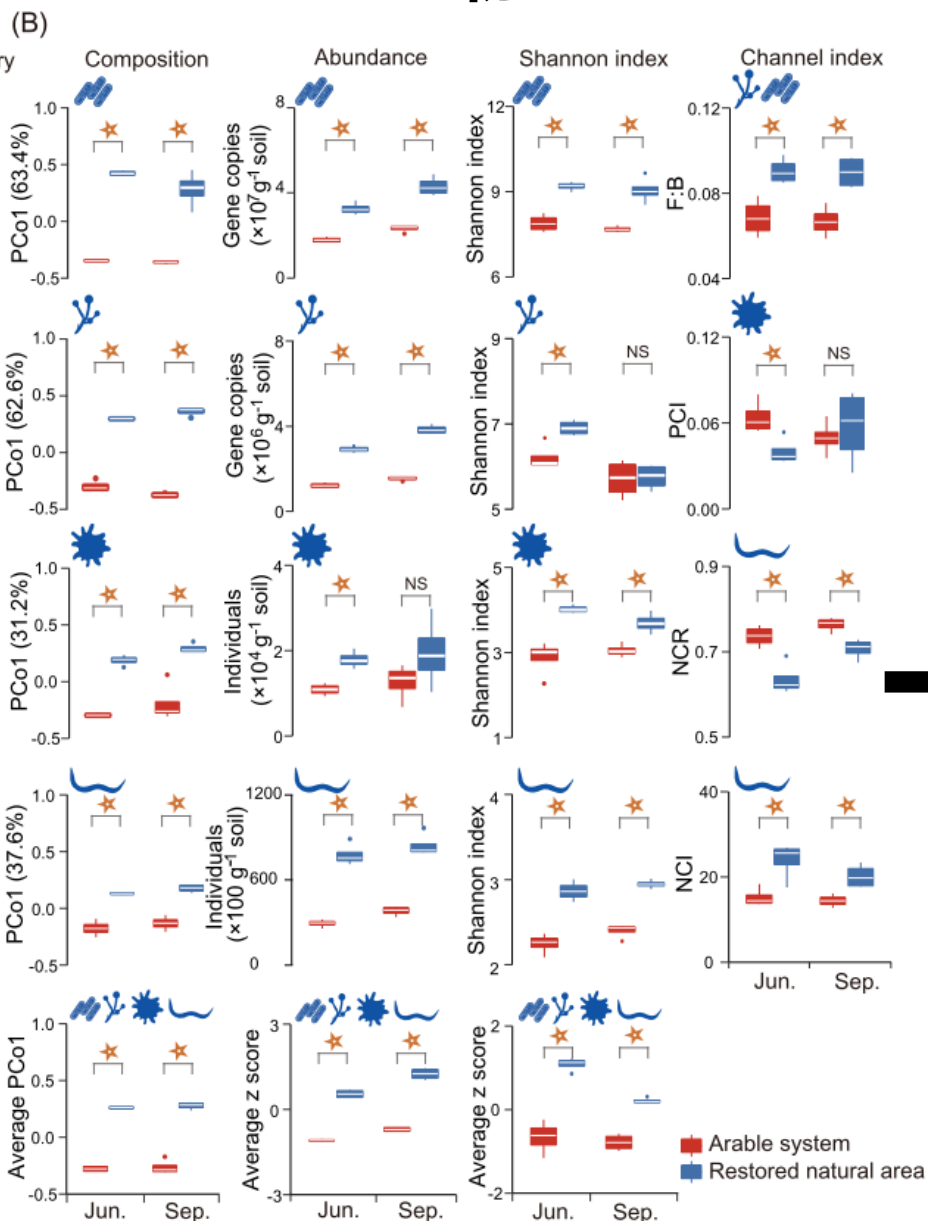


# 结果与讨论

## 底物



## 生物



## 1) 土壤微食物网特征

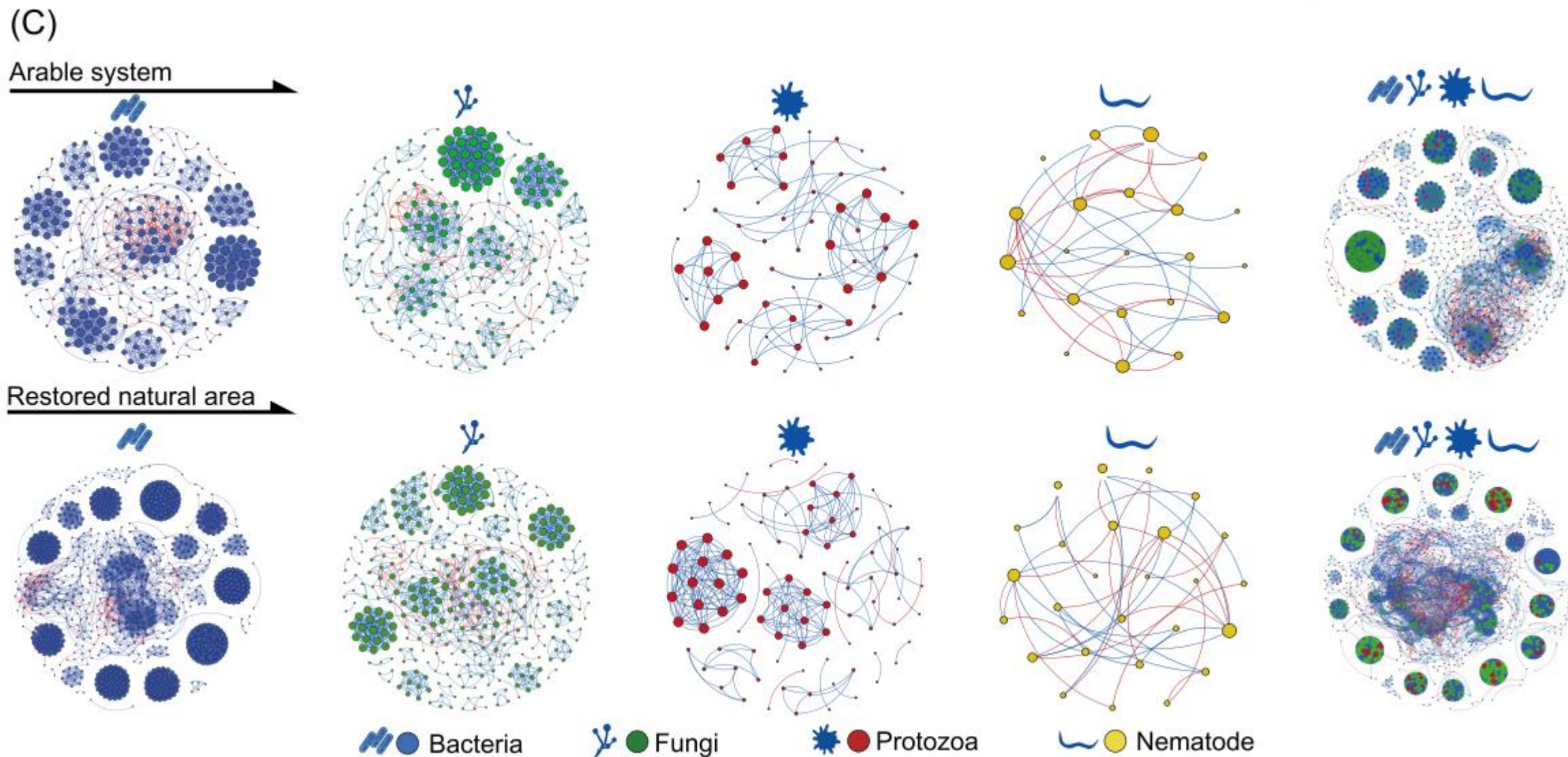
耕地系统转化为自然系统后，底物数量、质量和可分解性；土壤生物以及总体食物网生物的组成、丰度、多样性和分解通道指数发生显著变化。





# 结果与讨论

## 生物网络





# 结果与讨论

## 生物网络的复杂性和稳定性指数

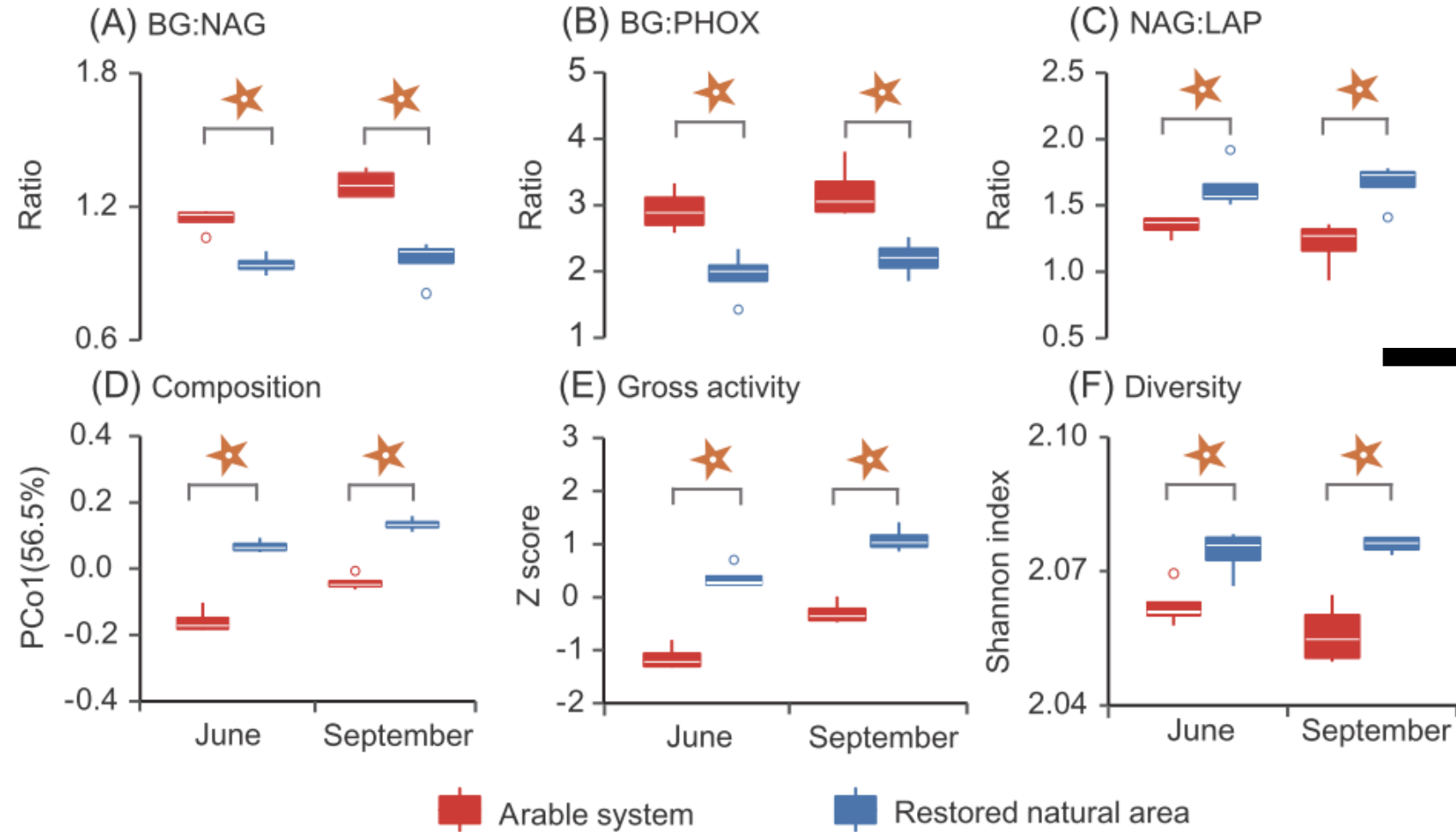
Network indices	Bacteria		Fungi		Protozoa		Nematode		Whole microbiota community	
	Arable system	Restored natural area	Arable system	Restored natural area	Arable system	Restored natural area	Arable system	Restored natural area	Arable system	Restored natural area
<i>Complexity indices</i>										
avgK	<b>6.85(3.34)</b>	<b>20.09(12.20)</b>	4.80(3.26)	5.08(2.23)	2.58(1.17)	3.41(2.68)	<b>1.80(0.61)</b>	<b>2.39(0.31)</b>	<b>11.93(7.22)</b>	<b>20.47(7.09)</b>
avgCC	<b>0.70(0.10)</b>	<b>0.89(0.10)</b>	0.65(0.16)	0.70(0.11)	1(0)	1(0)	0.28(0.31)	0.33(0.09)	0.86(0.08)	0.92(0.06)
GD	3.84(0.88)	4.66(2.42)	<b>3.88(0.66)</b>	<b>5.14(0.48)</b>	1(0)	1(0)	<b>2.05(0.59)</b>	<b>2.74(0.60)</b>	<b>3.76(0.24)</b>	<b>5.60(1.32)</b>
Con	0.05(0.01)	0.08(0.08)	0.03(0.01)	0.03(0.01)	0.29(0.29)	0.11(0.07)	0.12(0.03)	0.11(0.01)	0.03(0.01)	0.03(0.01)
<i>Stability indices</i>										
Robustness	0.28(0.01)	0.44(0.01)	<b>0.28(0.05)</b>	<b>0.30(0.01)</b>	<b>0.33(0.14)</b>	<b>0.35(0.04)</b>	<b>0.13(0.05)</b>	<b>0.19(0.02)</b>	0.31(0.03)	0.37(0.03)
Vulnerability	0.06(0.05)	0.02(0.01)	<b>0.06(0.03)</b>	<b>0.07(0.04)</b>	<b>0.08(0.07)</b>	<b>0.07(0.04)</b>	Na	Na	0.03(0.01)	0.01(0.01)

Parameter	Bacteria		Fungi		Protozoa		Nematode		Whole microbiota community	
	Arable system	Restored natural area	Arable system	Restored natural area	Arable system	Restored natural area	Arable system	Restored natural area	Arable system	Restored natural area
Positive link	<b>2673(2096)</b>	<b>9136(3087)</b>	2515(2133)	5458(4085)	<b>2673(2096)</b>	<b>9136(3087)</b>	<b>6.75(4.23)</b>	<b>13.88(1.96)</b>	<b>13362(10299)</b>	<b>34651(18535)</b>
Negative link	1345(815)	1181(411)	<b>916(398)</b>	<b>2114(718)</b>	<b>0(0)</b>	<b>8(4)</b>	<b>7.50(2.07)</b>	<b>13.50(2.67)</b>	<b>5409(2492)</b>	<b>8983(2582)</b>
Keystone taxa	0.63(0.92)	2.88(4.94)	2.75(3.01)	0.88(2.10)	0(0)	0(0)	0(0)	0.38(0.52)	6.75(10.59)	13.88(9.99)
Module	18.75(3.58)	18.50(2.20)	<b>21.88(2.80)</b>	<b>27.13(3.36)</b>	<b>4.88(2.23)</b>	<b>10.50(2.33)</b>	<b>3.38(0.92)</b>	<b>4.38(0.52)</b>	46.13(5.03)	48.88(5.28)

- 耕地系统转化为自然系统后，生物网络的复杂性和稳定性、正相关边数、负相关边数、关键类群数量和模块数量呈现显著增加的趋势。

# 结果与讨论

## 2) 土壤胞外酶谱指数



耕地系统转化为自然系统后，酶化学计量比、碳可分解性、通道指数、组成、总活性和多样性指数均呈现显著变化。



# 结果与讨论

## 酶网络的复杂性和稳定性指数

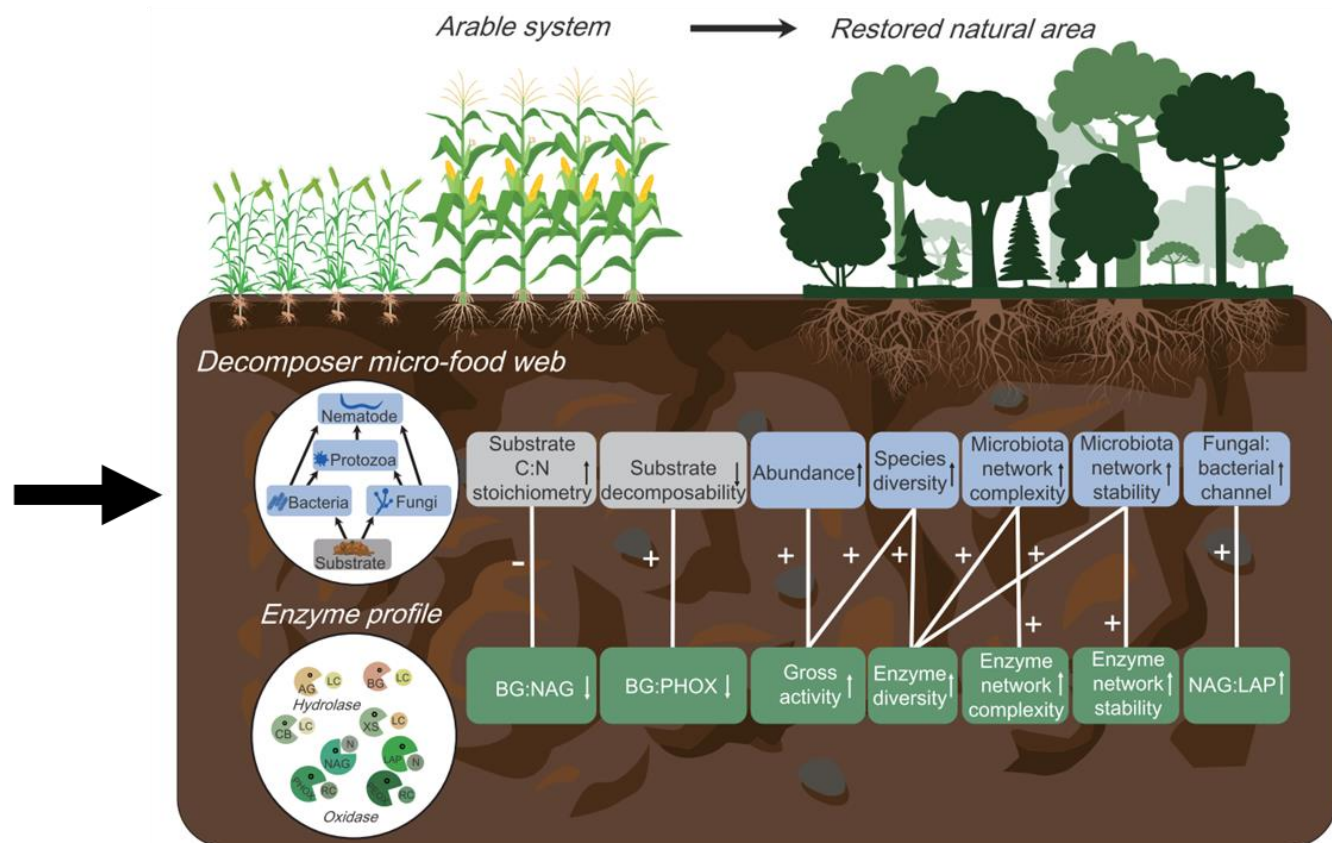
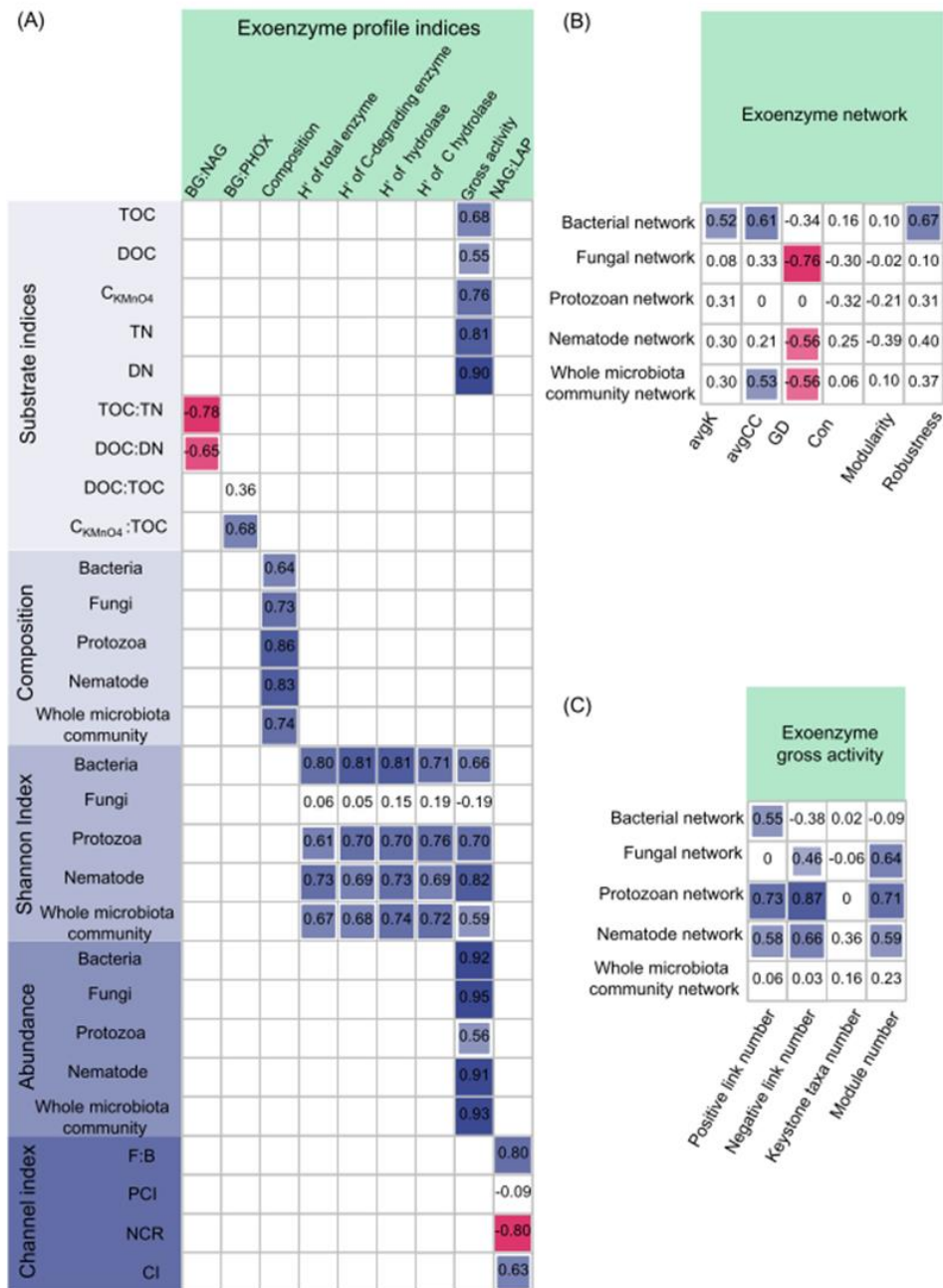
Network indices	Arable system	Restored natural area
<i>Complexity indices</i>		
avgK	<b>1.57(0.26)</b>	<b>2.53(0.62)</b>
avgCC	<b>0.30(0.19)</b>	<b>0.78(0.09)</b>
GD	1.81(0.17)	1.23(0.09)
Con	<b>0.27(0.05)</b>	<b>0.37(0.07)</b>
Modularity	0.26(0.09)	0.04(0.02)
<i>Stability indices</i>		
Robustness	<b>0.28(0.01)</b>	<b>0.44(0.01)</b>
Vulnerability	Na	Na



耕地系统转化为自然系统后，酶网络的复杂性和稳定性数值也显著增加。

# 结果与讨论

## 3) 土壤胞外酶指数与腐解微食物网特征的联系



土壤胞外酶指标可以有效的指示土壤微食物网中的底物和多营养级生物关键特征的变化。






# 总结

- (1) 本研究表明了土壤酶谱分析作为分解者微食物网特征的综合指示方法的重要性。
- (2) 在应用土壤酶谱分析法指示土壤食物网特征的时候，需要做到具体问题具体分析。
  - 首先，在特定酶的选择上要注意所选酶类和特定情境下目标食物网属性的内在关联性，并尽可能排除其它因素的干扰。
  - 此外，为了提高酶多样性及网络特征对于食物网相应特征的指示效用，应在关键酶类选择的基础上，尽可能扩大酶类范围。

Xing, Wen, Ning Hu, Zhongfang Li, Liangshan Feng, Weidong Zhang, Gerhard Du Preez, Huimin Zhang, et al. 2023.  
“Soil Enzyme Profile Analysis for Indicating Decomposer Micro-Food Web.” *iMeta* e161.  
<https://doi.org/10.1002/imt2.161>



“iMeta”是由威立、肠菌分会和本领域数百位华人科学家合作出版的开放获取期刊，主编由中科院微生物所刘双江研究员和荷兰格罗宁根大学傅静远教授共同担任。目的是发表原创研究、方法和综述以促进宏基因组学、微生物组和生物信息学发展。目标是发表前10%(IF > 15)的高影响力论文。期刊特色包括视频投稿、可重复分析、图片打磨、青年编委、前3年免出版费、50万用户的社交媒体宣传等。2022年的三月、六月和九月期已正式在线出版发行!

 主页: <http://www.imeta.science>  
 出版社: <https://wileyonlinelibrary.com/journal/imeta>  
 投稿: <https://mc.manuscriptcentral.com/imeta>

 [office@imeta.science](mailto:office@imeta.science)

 [iMeta](#)

[宣传片](#)

