

Тепловий баланс ґрунту та приземного шару повітря: Основи терморегулювання агроєкосистем

Тепловий баланс поверхні ґрунту є критичним фактором, що визначає мікроклімат агроєкосистеми. Розуміння та управління ключовими потоками енергії дозволяє оптимізувати ріст рослин та мінімізувати стрес.

1. Формула теплового балансу та ключові потоки

Розгорнуте рівняння теплового балансу поверхні ґрунту (ΔT):

$$R_n = Q_G + Q_H + Q_E + \Delta Q$$

де R_n — чистий радіаційний баланс; Q_G — потік тепла в ґрунт; Q_H — турбулентний потік тепла (відчутне тепло); Q_E — потік прихованого тепла (евапотранспірація); ΔT — зміна внутрішньої енергії.

Зміна частки потоку тепла в ґрунт (Q_G) та турбулентного потоку тепла (Q_H) впливає на ефективність **автоматизованого терморегулювання** в умовах надмірного сонячного випромінювання. Збільшення Q_G (наприклад, через вологість ґрунту) підвищує теплову інерційність, а збільшення Q_H (наприклад, через примусову вентиляцію) сприяє швидкому скиданню тепла в атмосферу.

2. Довгохвильове випромінювання та ефект парника

Роль **довгохвильового випромінювання** ґрунту та атмосфери є ключовою у формуванні нічного температурного режиму. Вночі ґрунт випромінює довгохвильове тепло, а атмосфера (особливо водяна пара та CO_2) частково повертає його назад (ефект парника).

Використання затінюючих або покривних матеріалів (наприклад, агроволокна) може керувати цим потоком, **зменшуючи ефективне нічне випромінювання** ґрунту, що **запобігає заморозкам**. Вдень ці матеріали можуть зменшувати надходження короткохвильової радіації, запобігаючи нічному перегріву.

3. Теплоємність ґрунту та вміст вологи

Залежність **об'ємної теплоємності ґрунту** від його вологості є прямою: вода має значно вищу теплоємність, ніж сухий ґрунт або повітря. Зі збільшенням вологості теплоємність ґрунту зростає.

Цю залежність можна скористатися для **моделювання інерційності** системи терморегулювання. Вологий ґрунт повільніше нагрівається вдень і повільніше охолоджується вночі. При розрахунку графіків зволоження, підвищення вологості може бути використане як інструмент для збільшення **теплової інерційності** системи, згладжуючи добові коливання температури.

4. Енергія фазових переходів (випаровування/конденсація)

Прихована теплота **евапотранспірації** (Q_E) є ключовим природним механізмом скидання надлишкового тепла. Кожен грам випарованої води поглинає близько 2.5 кДж енергії, ефективно охолоджуючи рослину та приземний шар повітря.

Інженерно підвищити цей потік (Q_E) для ефективного охолодження можна шляхом:

- Підтримання оптимальної вологості ґрунту (для забезпечення транспірації).
- Використання систем туманоутворення або дрібнодисперсного зрошення (для збільшення випаровування з поверхні листя та повітря).

Це критично важливо у періоди теплового стресу.

5. Вплив рослинного покриву на турбулентність

Зі збільшенням площі листової поверхні (LAI) **аеродинамічний опір** рослинного покриву зростає. Це призводить до зменшення інтенсивності турбулентного обміну теплом (Q_H) між покривом та атмосферою, оскільки потік повітря сповільнюється.

При проектуванні примусової вентиляції у закритих агроєкосистемах (теплицях) необхідно враховувати високий аеродинамічний опір густого покриву. Це вимагає більшої потужності вентиляторів або спеціальних систем розподілу повітря для забезпечення ефективного відведення Q_H та уникнення локального перегріву.

6. Альbedo та управління поглинанням енергії

Діапазон **альbedo** (частка відбитої сонячної радіації) типових ґрунтів і культур:

- Темний, вологий ґрунт: 0.05–0.15.
- Світлий, сухий ґрунт: 0.25–0.40.
- Здоровий рослинний покрив: 0.18–0.25.

Використання матеріалів із **високим альbedo** (наприклад, вапнування, світле мульчування) є інструментом **пасивного терморегулювання**. Це зменшує поглинання сонячної енергії, знижуючи температуру поверхні ґрунту та приземного шару повітря, що є економічно та екологічно доцільним.

7. Глибинне проникнення тепла

Фізичний механізм **теплопровідності** в ґрунті описується **законом Фур'є**: потік тепла пропорційний градієнту температури та коефіцієнту теплопровідності ґрунту.

Знання коефіцієнта теплової дифузії ґрунту використовується для моделювання глибини промерзання/прогрівання. Це дозволяє **оптимізувати розміщення теплообмінних елементів** (наприклад, труб підземного обігріву) на глибині, де добові та сезонні коливання температури мінімальні або передбачувані.

8. Боуен-коефіцієнт та стрес

Коефіцієнт Боуена ($B = Q_H / Q_E$) є індикатором розподілу енергії між відчутним теплом (Q_H) та прихованим теплом (Q_E).

Зростання коефіцієнта Боуена свідчить про те, що більша частина чистого радіаційного балансу витрачається на нагрівання повітря (Q_H), а не на випаровування (Q_E). Це прямо вказує на посилення **водного та теплового стресу** (недостатність вологи для транспірації). Ці дані можуть бути використані як **тригери автоматизації** для негайного включення систем зрошення або охолодження.

9. Моделювання теплового балансу в умовах кліматичних викликів

Спрогнозована **математична модель** для прогнозування температури повітря (T_{air}) може базуватися на припущенні, що зміна температури пропорційна чистому радіаційному балансу, скоригованому на втрати через евапотранспірацію (яка залежить від вологості ґрунту) та турбулентний обмін:

$$\frac{dT_{air}}{dt} \propto R_n - Q_E(W) - Q_H(T_{air})$$

де W — вологість ґрунту. Прогнозовані зміни вхідної сонячної радіації (кліматичні виклики) та вологості ґрунту дозволяють оцінити ризик перегріву та необхідність активного втручання.

10. Енергетична ефективність регулювання

Критерій **енергетичної ефективності** роботи системи **автоматизованого терморегулювання** (η) може бути сформульований як відношення досягнутого зниження теплового стресу (наприклад, зменшення різниці між фактичною та оптимальною температурою) до витраченої енергії (E):

$$\eta = \frac{\text{Ефект регулювання}}{\text{Енергетичні витрати } E}$$

Мінімізація необхідних енергетичних витрат (E) досягається шляхом **максимального використання природних потоків тепла** (наприклад, пасивне охолодження через високе альbedo або збільшення Q_E через зрошення) перед активацією енергоємних систем (наприклад, примусової вентиляції чи обігріву).